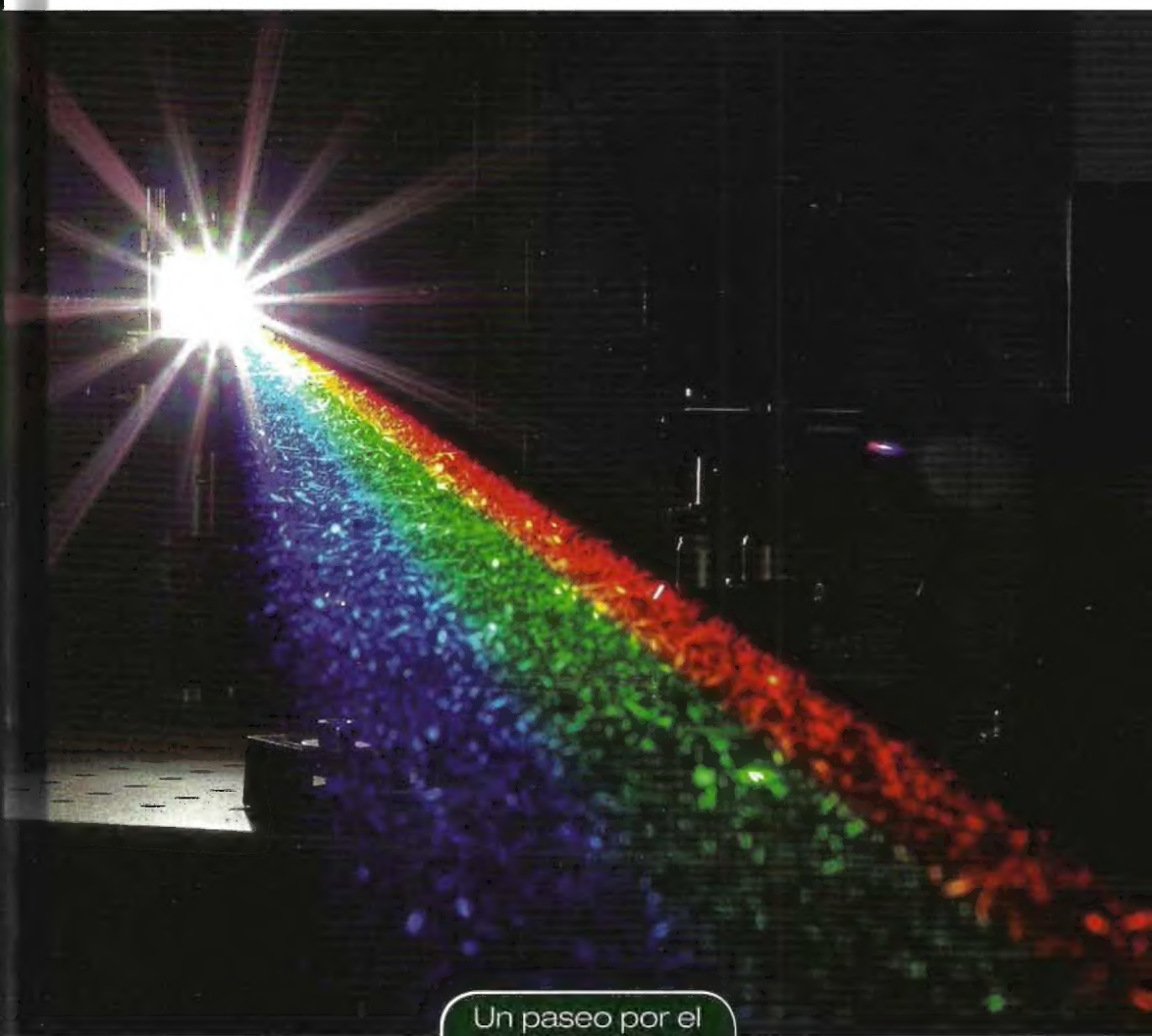


La física de la luz

Preguntas y respuestas en torno
a los fenómenos luminosos



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmureau.blogspot.com/>

La física de la luz

Preguntas y respuestas en torno
a los fenómenos luminosos

RBA

Imagen de cubierta: La luz blanca es descompuesta por un prisma en los colores del espectro visible.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Francisco Javier Romero Mora y José Antonio García García por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Andrew Dunn/Wikimedia Commons: 47a; Archivo RBA: 139a;
Dreamstime: 147a; Earth Observatory, NASA: 62-63; Erbe, Pooley (USDA, ARS,
EMU): 103; Fuerza Aérea Estadounidense (USAF): 117a; Sascha Grusche:
80-81; Viatcheslav N. Ivanenko *et al.*: 47b; Amanda Mills/CDC: 139b, 143a,
143b; NASA: 19b, 110-111; NOAA: 19a; Peeter Põksarv/Wikimedia Commons:
portada; Jackie Reid: 27; Universidad Carlos III de Madrid: 117b; Jacopo Werther/
Wikimedia Commons: 147b.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de
esta publicación puede ser reproducida, almacenada
o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8676-5

Depósito legal: B-8276-2017

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - Printed in Spain

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	¿Qué es la luz? 13
CAPÍTULO 2	Fuentes de luz e iluminación 41
CAPÍTULO 3	¿Qué hace la luz? 67
CAPÍTULO 4	¿Qué podemos hacer con la luz? 91
CAPÍTULO 5	¿Cómo vemos? 125
LECTURAS RECOMENDADAS	151
ÍNDICE	153

La luz no es únicamente un fenómeno físico percibido por un órgano de nuestro cuerpo, sino que resulta vital para gran parte de la vida que conocemos y así lo atestigua el paso por nuestro luminoso planeta de infinidad de especies durante la historia evolutiva.

La física de la luz es la parte de la ciencia que estudia este fenómeno de la naturaleza. La luz, al posibilitar la visión, nos da la oportunidad de usar el sentido que mejor nos permite relacionarnos con nuestro mundo. Gracias a ambas, la luz y la visión, el ser humano obtiene la mayor cantidad de información del exterior, entre el 60 y el 80% del total, cerca del doble que la aportada por todos los demás sentidos juntos.

El vehículo físico de la visión es la luz. Por ello, desde hace más de 2500 años nos hemos preguntado: ¿qué es lo que nos permite ver? De hecho, la parte de la física que estudia la luz, la óptica, toma su denominación de la palabra griega *optikos*, que viene a significar «relativo o perteneciente a la visión». El estudio de la luz, o entonces de la visión, era uno de los problemas fundamentales de la Grecia clásica, junto con la estructura de la materia y el conocimiento de los astros.

En la actualidad sabemos que estudiar la visión involucra varias ciencias: la física, la química, la fisiología y la psicología. A lo largo de los años, el estudio fundamental de la luz se ha separado del estudio de la visión con el fin de dar contestación a la gran pregunta sobre la naturaleza de aquella: ¿qué es la luz? Las respuestas mediante modelos físicos han sido variadas, prevaleciendo algunas que no son incompatibles entre sí. A su vez, los modelos para explicar su esencia han dado lugar a multitud de aplicaciones que están presentes en nuestra vida cotidiana, y que han desarrollado campos específicos de la ingeniería, la medicina y otras ciencias básicas o aplicadas. Pensemos, por ejemplo, en los instrumentos ópticos que tenemos en casa, como las cámaras fotográficas, o en los láseres que se utilizan en las comunicaciones telefónicas. No es de extrañar que 2015 fuera nombrado por la ONU Año Internacional de la Luz y de las tecnologías asociadas a ella. Téngase presente que los criterios usados para designar un Año Internacional indican que la temática debe ser de interés prioritario en las esferas política, social, económica, cultural y humanitaria o de derechos humanos, que afecte a la mayoría de los países y que pueda aportar soluciones.

Gracias a la luz se produce la fotosíntesis y la creación de la materia vegetal que permite comenzar una cadena alimentaria que llega hasta el mundo animal. Por tanto, es fundamental para la presencia y el desarrollo de casi toda la vida tal como la conocemos. Muchos animales y plantas precisan de ella para su existencia y también marca su desarrollo.

La luz que nos llega del Sol ilumina buena parte de nuestra vida cotidiana. Cuando este se oculta, o en ambientes de interior, podemos continuar nuestras actividades gracias a fuentes de luz artificiales que hemos desarrollado desde antiguo. La vida vegetal y animal de nuestro entorno depende asimismo de la luz en mayor o menor medida, de forma directa o indirecta. La solar tiende a marcar nuestro ciclo de vigilia y sueño de 24 horas y actúa en la sucesión de las estaciones del año. Podemos decir que la luz marca el ritmo de nuestras vidas. Además, da lugar a fenómenos naturales de gran belleza; de hecho, el arte de la pintura no existiría sin ella.

En la naturaleza encontramos fenómenos luminosos extraordinarios que han sido interpretados de diversas formas a lo largo de la historia, a menudo como símbolos de la relación entre la divinidad y los hombres. Pensemos por ejemplo en el arcoíris, cuando se descompone la luz del Sol en sus luces fundamentales de diversos colores, desde el violeta al rojo. Son las gotas de agua de lluvia las que hacen ese trabajo, mediante la refracción de la luz en su interior. Pero sin la ciencia no habría sido posible averiguarlo.

O pensemos en los halos coloreados que aparecen alrededor del Sol en los días fríos, como consecuencia también de la refracción en cristales de agua atmosféricos. O en muchos otros fenómenos luminosos extraordinarios, como las coronas, asimismo alrededor del Sol y que muestran el espectro de la luz solar, debidos a la difracción por partículas en el aire. Recordemos las auroras polares o las iridiscencias. O, simplemente, maravillémonos con los colores de la atmósfera, el azul del cielo, el anaranjado o rojizo de los amaneceres o atardeceres cerca del Sol, el color de las nubes, todos ellos fenómenos asociados al esparcimiento de la luz por las moléculas y partículas en la atmósfera que nos permiten disfrutar de escenas de gran belleza y que invitan a reflexionar sobre su origen y a que nos hagamos preguntas trascendentales.

En la naturaleza, la luz nos ofrece la posibilidad de observar colores de plantas y animales que resultan fascinantes, como fascinantes son los fenómenos de bioluminiscencia que presentan distintas agrupaciones de microorganismos. La belleza de los paisajes, en ocre y verde, es consecuencia de la luz reflejada en los terrenos o en las plantas, dando lugar, unido a las formas y al espacio, a paisajes maravillosos.

El ser humano ha jugado con la luz para crear obras en las que la belleza lumínica es patente, en especial en la pintura y la arquitectura. No nos referimos solo a pintores que saben reflejar de forma excepcional la luz abundante en sus cuadros, como Joaquín Sorolla, sino a todos los maestros que han plasmado en sus pinturas las luces intensas, los contrastes lumínicos, los clarososcuros, o el colorido de telas, naturalezas muertas o paisajes.

Multitud de autores, como Rubens, Constable o Turner, han representado de forma magistral fenómenos luminosos en la atmósfera, como el arcoíris, y expresado de forma a veces trágica el color del cielo o las tormentas.

Por otra parte, los arquitectos manejan la luz en sus diseños y construcciones para crear ambientes e incluso emociones. Los usos de distintos elementos arquitectónicos se conjugan para que la luz del Sol penetre en los edificios creando volúmenes estéticamente placenteros, funcionales y energéticamente sostenibles. La utilización del color es asimismo muy importante en la arquitectura, con maestros como Le Corbusier o Josef Albers.

Iluminar de forma adecuada es fundamental para el desarrollo apropiado de las tareas que precisan luz, que son la mayoría de nuestra vida cotidiana. Esta proporciona confort visual si sus fuentes están bien colocadas. Los espacios exteriores, calles, plazas y cruces, deben estar bien iluminados, con la cantidad de luz correcta, de manera que sea suficiente y a la vez implique una mínima contaminación lumínica. En interiores, no debe deslumbrar y sí tener un contenido espectral adecuado para que los objetos puedan ser vistos con su color esperado. La cantidad de luz ha de estar acorde con la tarea a realizar, aumentando con el detalle exigido.

Cada vez más, la luz está en las tecnologías que incorporamos a nuestra vida. Cuando usamos el teléfono fijo para una conversación o recibimos datos a través de cable, estamos ya en muchos casos empleándola. Ello se debe a que las conversaciones telefónicas y los datos han pasado a transmitirse sobre el soporte de la luz introducida por un sistema optoelectrónico equipado con una fuente lumínica de tipo láser, y gracias a un cable formado por multitud de fibras ópticas, que la transportan con pocas pérdidas. Así pues, la luz lleva el habla, las imágenes y los textos.

Otras veces convertimos luz en electricidad o en calor, mediante placas solares, y de esta forma podemos iluminar o tener agua caliente en nuestras casas. La luz es energía y se puede convertir en otros tipos con los materiales adecuados, como los utilizados en dichas placas. O se pueden utilizar espejos para calentar un líquido del que se obtenga vapor, el cual mueva una

turbina para obtener a su vez electricidad, como en las centrales termosolares. Este tipo de energías renovables no alcanzan aún el rendimiento necesario para hacerlas económicamente competitivas frente a las tradicionales de combustión de materiales fósiles, pero en determinadas situaciones sí pueden serlo y el futuro pasa, sin duda, por su diversificación, con especial crecimiento de aquellas menos o nada contaminantes.

A menudo se dice que vivimos en un mundo de imágenes, obteniéndose estas, en la mayoría de los casos, con luz y sistemas ópticos. Pensemos en las cámaras de video o televisión, las cámaras de vigilancia, las fotográficas, los sistemas de visión nocturna, los escáneres o las pequeñas cámaras de nuestros teléfonos móviles. Tanto la captación de imágenes como su reproducción se hace con luz, ya sea esta última en formato papel o mediante pantallas de visualización: televisiones y monitores de distintas geometrías y tamaños. Estamos observando continuamente imágenes a través de dispositivos que emiten luz, como las pantallas de nuestros móviles o las de un ordenador o tableta. El mundo de la imagen digital ha revolucionado nuestras comunicaciones, siendo el sistema captador de imágenes casi siempre óptico, con un sistema de lentes y/o espejos y un posterior sistema optoelectrónico que las convierte en conjuntos de datos manipulables mediante *software*, para ser procesados y enviados a otros dispositivos. Finalmente, estos serán visualizados de nuevo mediante otro sistema optoelectrónico que permite el proceso inverso de convertir datos en luz, como es el caso de las pantallas y monitores.

Este nuevo mundo ha dado lugar a una nueva palabra asociada a las nuevas tecnologías de la luz: la *fotónica*. Así denominamos a la óptica aplicada a las ingenierías que surgieron del desarrollo de los láseres y los semiconductores a partir de la década de 1960. La fotónica abarca desde las comunicaciones con láseres a sus aplicaciones en campos tan variados como la espectroscopia, la detección de contaminantes con sistemas LIDAR (del inglés *Laser Imaging Detection and Ranging*) o la medicina. Pensemos en el desarrollo del bisturí láser o en el uso de láseres para fotocoagulación. Asimismo, los dispositivos ba-

sados en la utilización de semiconductores y luz han revolucionado los sistemas de control, las comunicaciones, los sistemas de vigilancia y, en el futuro, los sistemas de computación, ya que emplearán luz para hacer operaciones lógicas con mayor rapidez y capacidad. Todo ello, sin mencionar las aplicaciones militares relacionadas con la detección y destrucción de blancos.

Pero la luz, además de su importancia en la ciencia, la tecnología y el arte, ha sido también utilizada conceptualmente como argumento simbólico en la religión y en la literatura. Identificada con la idea de Dios, aparece en los textos sagrados de las grandes religiones monoteístas: judaísmo, cristianismo e islamismo. En ellos aparecen frases en las que se afirma que Dios es luz o que Dios ilumina el mundo. En la literatura y la filosofía su identificación con el entendimiento o la imaginación es muy frecuente, como cuando se escribe que a alguien «se le hizo la luz».

Esta, en definitiva, es parte sustancial de nuestras vidas, valiéndonos de ella y manipulándola cada vez más a medida que la humanidad avanza hacia mayores cotas de desarrollo y progreso. Su estudio es fundamental para hacer un uso adecuado de ella y para conocer mejor su naturaleza.

¿Qué es la luz?

La luz es uno de los fenómenos esenciales de la naturaleza cuyo estudio ha interesado al ser humano desde hace miles de años. Pero ¿qué es exactamente? Los científicos la relacionan con la visión, mientras buscan obtener aplicaciones para ella en la vida cotidiana y en los ámbitos científico y técnico.

Para conocer las características básicas de la luz debemos comenzar por observar de dónde proviene, es decir, cuáles son sus fuentes a nuestro alrededor. Está claro que, en nuestra vida cotidiana, la luz procede principalmente del Sol. Esta es la fuente de luz fundamental en nuestras vidas, abundante y, además, gratuita. Cuando no hay sol tenemos que recurrir a fuentes artificiales para continuar nuestras tareas diarias.

La luz procedente del Sol es modificada ligeramente por la atmósfera. Así, en un día nublado no la recibimos de forma directa, sino esparcida por las nubes. Si el día está despejado, además de la luz solar directa que observamos al mirar a nuestra estrella, también vemos aquella que proviene de la atmósfera, de lo que comúnmente llamamos cielo. Esta luz tiene un tono azulado y es consecuencia de la interacción de la luz solar con las moléculas del aire. Como habremos podido observar en cualquier película de viajes espaciales, en la Luna no hay cielo luminoso, ya que carece de atmósfera.

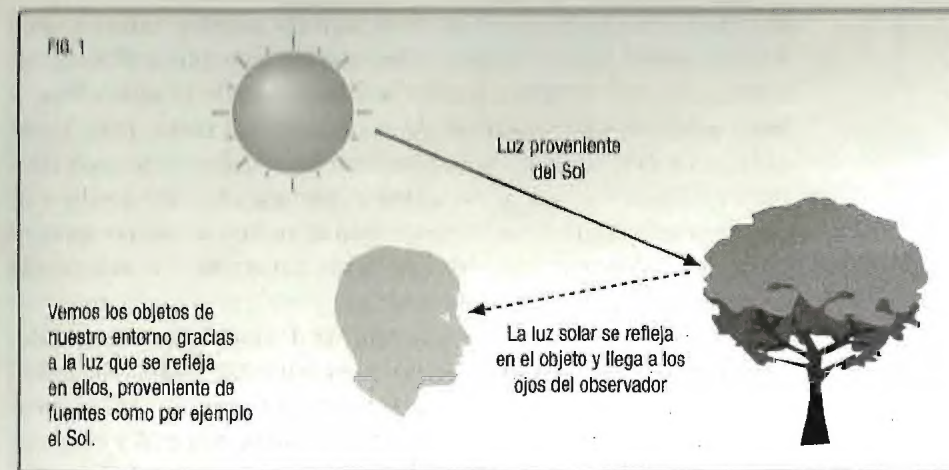
Queda implícito en lo expuesto que sabemos que hay luz en la medida que esta llega a nuestros ojos. Constatamos que nos llega la luz del Sol porque cuando dirigimos la mirada hacia él

lo vemos, es decir, que la luz que sale de nuestra estrella viaja hasta llegar a nuestro ojo y este, que es sensible a ella, la detecta. De igual forma, también nos llega luz de la atmósfera, y por eso la vemos luminosa y no oscura. Así pues, para tener noticias sobre la luz no solo nos hará falta una fuente sino también un detector, o sea, un sistema que sea sensible a ella, que proporcione algún tipo de respuesta al recibirla, como sería el caso del sistema visual, una emulsión fotográfica o una célula fotoeléctrica.

Pero volvamos a las fuentes de luz. Como hemos indicado, el Sol es la principal que tenemos en nuestras vidas. Necesitamos su luz para ver y para vivir, como la necesitan las plantas para realizar la fotosíntesis, crear así materia vegetal y con ello iniciar la cadena alimentaria de todo el reino animal. Además, en nuestra vida cotidiana empleamos fuentes luminosas que no son naturales, sino artificiales, dispositivos creados por el ser humano para conseguir luz. En un principio fueron el fuego, las antorchas, los candiles, etc. En la actualidad disponemos de muchos tipos de lámparas, a las que vulgarmente llamamos bombillas, tubos fluorescentes o LEDs, y estamos acostumbrados a disponer de ellas con solo apretar un interruptor. Los tubos fluorescentes son muy empleados en la iluminación de espacios públicos interiores, como tiendas, oficinas, etc. Las lámparas de mercurio y de sodio son utilizadas en la iluminación de calles y carreteras, proporcionando estas últimas una luz de color amarillo anaranjado.

Sea con el Sol o con las fuentes de luz artificiales mencionadas, debemos iluminar los objetos que nos rodean para poder verlos. Cuando la luz del Sol u otras fuentes llega a objetos que no emiten luz por sí mismos, estos la pueden reflejar de tal modo que alcance a nuestros ojos. Esta luz reflejada por los objetos y captada por nuestra mirada permite que los veamos y al mundo que nos rodea en general (figura 1).

Pero la luz no solo se utiliza para ver. También se emplea para muchas aplicaciones instrumentales o tecnológicas. Por ejemplo, para estudiar su absorción por distintas sustancias y con ello caracterizarlas. O para transmitir información, como



se hace cuando se introduce luz de un *láser* en haces de fibras ópticas y así enviar conversaciones telefónicas o datos a larga distancia.

De la luz emitida por una fuente, sea cual sea esta, nos interesará una serie de características: su *propagación*, su *potencia luminosa*, su *composición espectral* y su *estado de polarización*. Hablar de estos cuatro conceptos supone empezar a responder a la pregunta planteada originalmente en este capítulo: ¿qué es la luz?

CUANDO LA LUZ SE PROPAGA

La gran mayoría de las fuentes de luz emiten en todas direcciones. Observemos la lámpara o el tubo fluorescente que ilumina una habitación. Si el interruptor está activado, la veremos desde multitud de posiciones, independientemente de dónde nos situemos. Dentro de un espacio como la habitación considerada sabemos que la luz viaja en línea recta, es decir, que el recorrido que realiza desde un punto de la lámpara emisora hasta nuestro ojo ha sido rectilíneo. A esa trayectoria la llamamos *rayo de luz*. Es muy común representar la luz emitida por una lámpara con un

conjunto de flechas que salen de la misma, queriendo simbolizar a los rayos de luz, y con ello, las trayectorias que seguirán para ir de la fuente emisora a cualquier punto del espacio. Es importante resaltar que hablamos de un espacio muy reducido, una

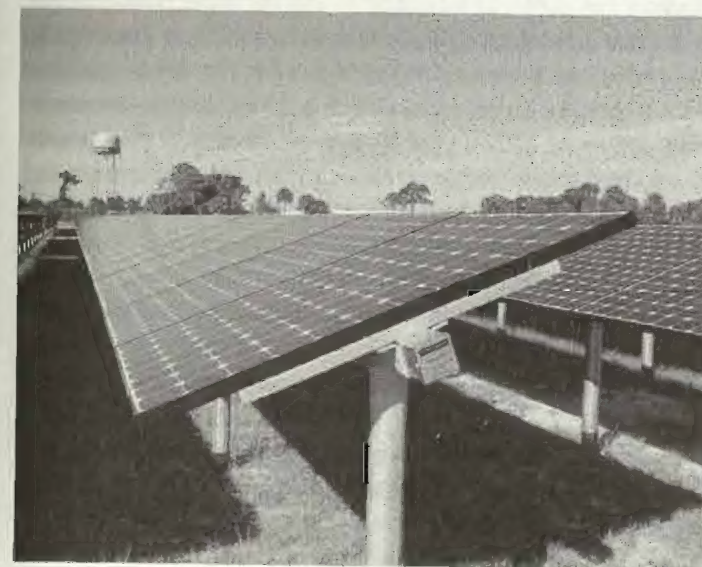
habitación; en ella podemos considerar que el aire que contiene constituye un medio homogéneo e isotrópico, donde la propagación de la luz es rectilínea. Sin embargo, si el medio no es homogéneo e isotrópico, esta puede seguir una trayectoria curvada, como

ocurre en la atmósfera cuando observamos los llamados *espejismos*.

Si vemos la luz de la lámpara desde cualquier punto de la habitación es porque la emite en todas direcciones, y siempre podremos encontrar el rayo que va desde la fuente hasta nuestro ojo. Sin embargo, existen fuentes de luz que la emiten en una sola dirección. El caso más sobresaliente es el láser. Esta fuente de luz se emite dentro de un cilindro, normalmente de sección pequeña. Es lo que se conoce como *haz de luz*, en este caso, *haz láser* (en rigor, la forma correcta de referirnos a la luz emitida por este dispositivo, y no «rayo láser», que implicaría la emisión en una sola línea). No veremos la luz de un láser a no ser que pongamos el ojo en su camino, lo cual no es precisamente aconsejable, o que hagamos que la difunda el polvo o el vapor de agua del aire, o que se refleje en una superficie rugosa, como una pared.

LA IMPORTANCIA DE LA POTENCIA LUMINOSA

La luz es la energía radiante capaz de estimular el proceso de la visión. Esta definición, que encontramos en distintos libros de texto, tiene dos partes fundamentales. La primera se refiere a la luz como una energía emitida por determinadas fuentes de radiación. Deducir que se trata de energía es relativamente sencillo, ya que se sabe que la luz se transforma en otras formas de



El Sol es nuestra principal fuente de luz. En muchos casos, organizamos nuestra vida en función del ciclo día-noche impuesto por la luz solar. En la fotografía de arriba, puesta de sol en una playa de Pensacola, Florida, Estados Unidos. Mediante paneles solares (izquierda), la luz del Sol se puede aprovechar para generar electricidad.

energía. Recordemos que existe un principio fundamental de la física que nos dice que la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. Constatamos que la luz nos puede calentar al recibirla sobre la piel, o convertirse en energía eléctrica a través de células fotoeléctricas. De forma inversa, la energía eléctrica que alimenta a una lámpara se convierte en luz y calor.

La segunda parte de la definición nos indica que entre los distintos tipos de radiación llamamos luz a aquella que vemos directamente, es decir, a la que al entrar en nuestros ojos es capaz de estimular las células fotosensibles de nuestras retinas. Otras radiaciones, como la ultravioleta, la infrarroja, las microondas o las ondas de radio, no son visibles para nosotros. Así, a una lámpara de ultravioleta la veríamos negra, salvo que, como es habitual, emita un poco de luz azul, que nos permite saber cuándo está encendida.

Si entendemos la luz como una forma de energía, podremos pensar en *vatios* de luz emitida por una lámpara o de luz recibida en un receptor o superficie. Los vatios son unidades de potencia, en nuestro caso potencia luminosa, o también, de energía por unidad de tiempo.

La potencia emitida por una fuente de luz será una característica muy importante de la misma ya que puede condicionar la aplicación para la que se emplee. A veces se necesita una gran cantidad de energía. Así, si lo que queremos es iluminar una autopista o un estadio de fútbol necesitaremos lámparas muy potentes, pues se trata de iluminar áreas extensas a gran distancia. En otras ocasiones la cantidad es más modesta: por ejemplo, si queremos una lámpara para el sistema de iluminación de un microscopio no precisaremos una fuente de luz muy intensa, ya que podría calentar en exceso las muestras y deslumbrar a la persona que mirase a través de él.

Cuando compramos una lámpara podemos ver especificada su potencia, por ejemplo 5 W o 600 lúmenes. En estos casos, los vatios se refieren a la potencia de consumo eléctrico y los lúmenes al *flujo luminoso* emitido por la lámpara. Esta unidad, el *lumen*, nos da una idea más adecuada de la cantidad de luz que vamos a obtener con el dispositivo.

ASÍ SE DIVIDE LA LUZ

Es muy posible que a lo largo de nuestra vida hayamos observado muchas veces un arcoíris. Se forma por la descomposición de la luz solar en las pequeñas gotas de agua que quedan en la atmósfera tras la lluvia. Pero de momento no nos vamos a fijar en cómo se forma sino en su resultado: la luz del Sol, en principio blanca, parece estar formada por una suma de otras cuyos colores son el rojo, el naranja, el amarillo, el verde, el azul, el añil y el violeta. Este fenómeno de la naturaleza pone de manifiesto lo que se conoce como *composición espectral* de la luz solar. En efecto, la composición espectral, o contenido espectral, o simplemente *espectro*, es una representación de los componentes en los que podemos dividir una luz determinada. Parece, por tanto, que la luz, al menos la blanca, no es algo indivisible, sino que contiene otras que sumadas dan la original.

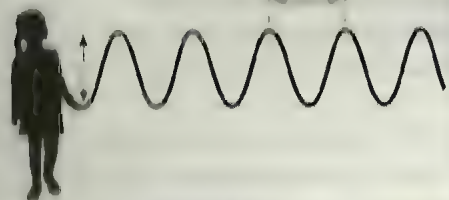
Pero no nos basta con decir los nombres de los colores que forman el contenido espectral de una luz para hacer una adecuada descripción del mismo. Hemos de recurrir a algo más preciso y evaluable con números. Se habla entonces de *longitudes de onda* y de *frecuencias*. Ahora bien, para introducir estos conceptos es inevitable hablar de la luz como *onda*.

Para que la luz brille tanto,
debe estar presente la oscuridad.

FRANCIS BACON

Todo empieza en las ondas

Veamos un experimento que se puede realizar de forma sencilla. Si tomamos por un extremo una cuerda larga y movemos nuestro brazo hacia arriba y hacia abajo, sin parar, estaremos haciendo que la cuerda adquiera también ese mismo movimiento, el cual se propagará hacia delante. Podemos apreciar efectivamente que cada punto de la cuerda se mueve hacia arriba y hacia abajo, pero que, al mismo tiempo, la posición de la cuerda en la que esta está más alta se va desplazando hacia delante. Un experimento similar a considerar sería tirar una piedra a un estanque en reposo.

λ (longitud de onda)

Ondas en una cuerda creadas por el movimiento del brazo



Ondas en un estanque generadas por la caída de una piedra

Ejemplos cotidianos de ondas.

Con estos experimentos (figura 2) estamos generando ondas. Una onda no es más que una perturbación que se propaga en el espacio y en el tiempo. Lo que se propaga en el primer experimento (a la izquierda de la figura 2) es el desplazamiento de los puntos de la cuerda hacia arriba y hacia abajo. Las ondas no implican desplazamiento neto de materia, sino de energía: la cuerda no se desplaza hacia delante, pues la mantenemos sujeta por un extremo, pero sí el movimiento de desplazamiento vertical. Como hemos indicado, si nos fijamos en un punto de la cuerda (para mejorar su visualización podemos, por ejemplo, atarle una cinta roja), este sube y baja continuamente. El tiempo que tarda desde que está en la posición más alta hasta que vuelve a estar en ella, tras haber pasado una vez por la más baja, lo llamamos *periodo*, y a su inversa, *frecuencia*. Este último término nos indica la rapidez del movimiento de subida y bajada: si la cinta roja sube y baja en muy poco tiempo, el periodo es pequeño, y la frecuencia, alta. Es, por tanto, una medida del número de repeticiones del movimiento. Si la bajada y la subida se repiten 6 veces en, por ejemplo, un minuto, diremos que la frecuencia es de 6 bajadas y subidas por minuto. Si llamamos *ciclo* a cada bajada y subida, diremos que es de 6 ciclos por minuto (6 ciclos/min). Si en vez de minutos empleamos segundos, dividiremos los 6 ciclos por los 60 segundos que tiene un minuto, de manera que

6 ciclos/60 s = 0,1 ciclos/s = 0,1 hercios. La unidad *hercio* (Hz) es muy conocida: se usa habitualmente para localizar emisores de radio en el dial. Por ejemplo, las populares radios comerciales en FM (frecuencia modulada) emiten en una frecuencia determinada establecida en megahercios (por ejemplo, 95,4 MHz), donde 1 megahercio es 1 millón de hercios.

Siguiendo con nuestro experimento de la cuerda, en vez de «congelar» un punto de ella vamos ahora a congelar el tiempo. Lo que obtendremos con eso es una imagen fija, como las de la figura 2, que nos permitirá apreciar mejor los detalles. Llamamos entonces *longitud de onda* a la distancia existente entre dos crestas consecutivas, una magnitud que se representa habitualmente con la letra griega λ (lambda). Como vemos en el ejemplo izquierdo de la figura 2, la longitud de onda es la distancia entre dos puntos consecutivos de la cuerda con igual valor de la perturbación que se propaga. Viene a tener el mismo sentido en el espacio que el que tiene el periodo en el tiempo. También podría definirse diciendo que es el espacio recorrido por la onda durante el tiempo en que esta realiza una oscilación completa o periodo.

«Descongelemos» ahora el espacio y el tiempo y repitamos nuestro experimento. Como observábamos, la onda se propaga hacia delante y lo hace a una cierta velocidad. Dicha velocidad nos la dará el espacio que recorre la perturbación en un determinado tiempo. En otras palabras, si nos fijamos en la cresta de la onda, esta se desplaza una distancia en un tiempo determinado, y el cociente entre ambas será la velocidad. Si, por ejemplo, se desplaza 2 metros en 1 segundo, diremos que la onda lo hace a una velocidad de 2 metros por segundo, o sea, 2 m/s. Si llamamos v a la velocidad de la onda, se puede deducir que existe una relación entre velocidad, longitud de onda y periodo (T), y frecuencia (f), en la forma:

$$v = \lambda / T = \lambda f.$$

Como vemos, la longitud de onda y la frecuencia de la onda están relacionadas a través del valor de la velocidad de la misma.

La luz y las ondas electromagnéticas

Se ha indicado en un apartado anterior que la luz es un tipo de energía radiante. A partir del siglo xvii se creyó que este modelo necesitaba una mejora, ya que se empezaron a constatar comportamientos ondulatorios para la luz, como es el caso de los fenómenos de *difracción*, *interferencia* y *polarización*. Pensar en la luz como una onda no debería presentar problemas respecto al modelo anterior, que la consideraba energía radiante a secas, ya que estas ondas transportan energía al propagarse. Digamos que los dos modelos son compatibles. Las cuestiones que se nos plantean ahora son realmente otras: ¿qué tipo de onda es? o, dicho de otra forma, ¿cuál es la perturbación que se propaga?, ¿cuál es su longitud o longitudes de onda? y ¿cuál es su velocidad?

La última de las preguntas es la más fácil de responder, ya que no ha hecho falta considerar a la luz como onda para medir su velocidad. Muchos investigadores desde antaño la han medido correctamente. Se sabe que esta velocidad en el aire es muy elevada, casi 300 000 km/s, y que disminuye en otros medios. Así, en el agua puede alcanzar alrededor de 225 000 km/s.

La cuestión de su naturaleza y su longitud de onda resultó ser un poco más complicada. Gracias a los trabajos teóricos de James Clerk Maxwell y otros investigadores de finales del siglo xix y principios del xx, sabemos que podemos considerar a la luz visible como *ondas electromagnéticas*, y que cuando se propaga en el aire o en el vacío presenta longitudes de onda que van, aproximadamente, desde los 400 a los 700 nanómetros (nm). Un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro.

Lo más interesante de que la luz sea una onda electromagnética es que lo que se propaga es simultáneamente un campo eléctrico y otro magnético. Puede costar trabajo imaginarlos propagándose y variando en el espacio y el tiempo, pero de una forma algo más simple podemos decir que se trata de perturbaciones que pueden afectar a las cargas eléctricas que encuentren en su camino.

Aun desconociendo lo que son un campo eléctrico y uno magnético, podemos tener suficiente con admitir que la luz se

comporta como una onda con determinadas longitudes de onda. En muchos trabajos o aplicaciones bastará con esto. Y ello es debido a que el término longitud de onda es el que nos permite distinguir unas radiaciones de otras. Así, como otras radiaciones (ondas) electromagnéticas tendremos a los rayos gamma, los rayos X, la radiación ultravioleta, la infrarroja, las microondas, las ondas de radio y las de televisión (estas tres últimas a menudo catalogadas colectivamente como ondas de radio). La característica fundamental que las distingue es el valor de dicha longitud de onda. Por ejemplo, una radiación de 2 nm corresponde a los llamados rayos X, y si es de 290 nm la enmarcaremos en el ultravioleta. Por su parte, las ondas electromagnéticas con longitud de onda de 1 500 nm se encuentran en el infrarrojo, y las de 2 mm en las microondas. Las ondas de radio tienen longitudes de onda de metros e incluso kilómetros.

Dentro de las radiaciones que denominamos luz visible, las longitudes de onda están relacionadas con el color de la luz correspondiente. Así, la luz con longitudes de onda entre 400 y 460 nm se aprecia de color azul. Si estas aumentan la percibiremos sucesivamente como azul verdosa y verde azulada. Las luces de longitudes de onda alrededor de 520 a 550 nm las veremos verdes, y las de alrededor de 570 nm, amarillas. Las de 590 a 610 nm se apreciarán de color naranja, y con mayor longitud de onda, rojas.

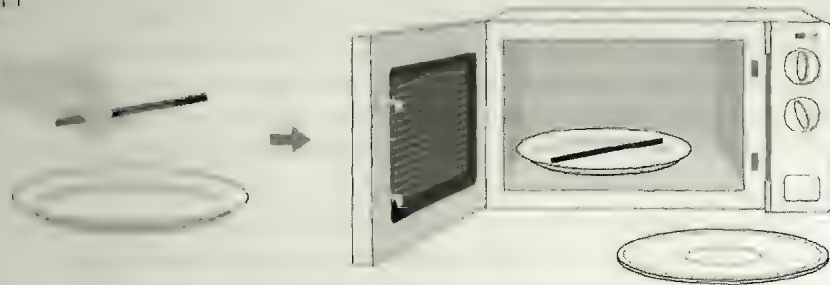
La luz visible se sitúa dentro del espectro electromagnético entre el ultravioleta y el infrarrojo. Como vemos, la longitud de onda caracteriza las propiedades y aplicaciones de la radiación. De este modo, la luz visible nos sirve para ver, pues nuestro sistema visual solo es sensible a longitudes de onda de entre 400 y 700 nm. O, como mucho, entre 380 y 760 nm. Las microondas, en cambio, se emplean para las comunicaciones con teléfonos móviles o para calentar alimentos. El infrarrojo resulta útil para la fibra óptica y para los mandos a distancia que tenemos en casa. El ultravioleta es apto para broncearnos y para sintetizar la vitamina D. Los rayos X permiten realizar radiografías. Etcétera.

Las ondas electromagnéticas tienen pues una importancia capital en nuestra vida, tanto por su influencia en la naturaleza

Midiendo la velocidad de la luz

Antes de poder hacer un experimento realizable en casa que nos permita medir la velocidad de la luz, necesitamos un horno de microondas y una barra o pastilla de caramelo blando (lo regaliz de entre 10 y 15 cm). También nos vendrá la galletina conocida como "regaliz de queso" o "maria" tallada, o una cinta similar que podemos hacer con plastilina. El horno de microondas es una cavidad resonante y en él se producen ondas estacionarias. Sin entrar a detallar lo que esto supone, podemos decir que estas ondas se caracterizan por tener

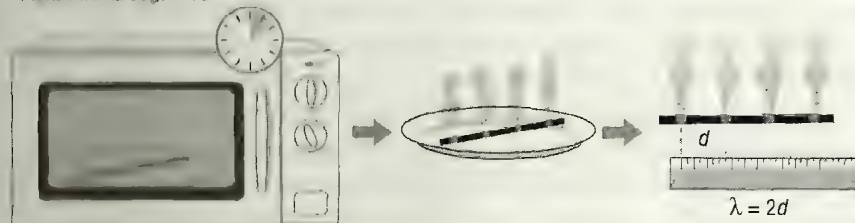
Fig. 1



Se coloca un plato normal con la barra de caramelo blando de regaliz o similar dentro de un horno de microondas al cual se le ha retirado el plato giratorio.

Fig. 2

Menos de 30 segundos



Después de unos segundos de calentamiento, se saca del horno de microondas el plato con la barra. Debe haber puntos con señales claras de estar más calientes que el resto de la barra. Midiendo la distancia (d) entre dos de estos puntos consecutivos se obtiene un valor que, multiplicado por 2 ($2d$) equivale a la longitud de onda (λ).

unos puntos en los que existe una gran concentración de energía y que entre uno y otro de estos puntos se halla una zona equivalente a media longitud de onda (por esta razón cuando calentamos algo en el microondas, nos encontramos puntos muy calientes y otros bastante más fríos, y para minimizar esto se incluye un plato giratorio). Con este experimento podemos medir una distancia y, por tanto, la longitud de onda de la onda producida.

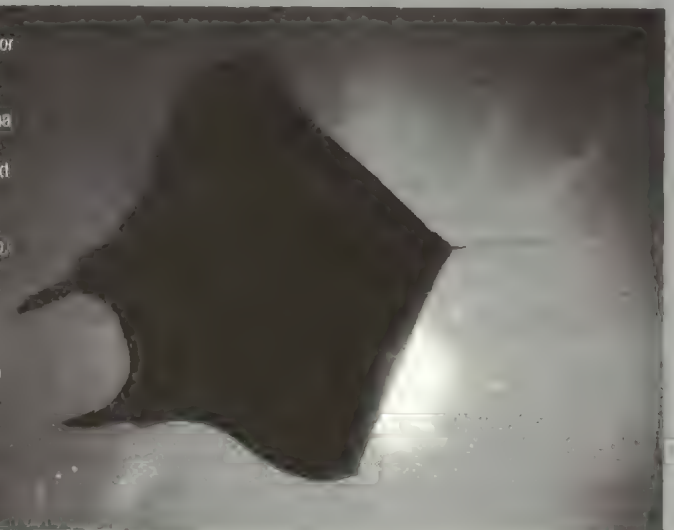
Manos a la obra

Quitaremos el plato giratorio del microondas y después colocaremos en su interior otro en el que habremos colocado la barra de regaliz (figura 1). A continuación, pondremos en marcha el aparato, en la potencia mínima. Deberemos estar pendientes y apagarlo transcurridos unos segundos, o de lo contrario se nos quemará la barra. El tiempo óptimo depende de cada horno. Al sacar el plato, veremos que en la barra de regaliz hay puntos donde esta se halla muy caliente, casi fundida: si medimos con una simple regla la distancia de separación entre dos de estos puntos consecutivos (como se aprecia en la figura 2), esta equivaldrá a media longitud de onda, por lo que, al multiplicarla por dos, tendremos la longitud de onda que buscábamos.

Algunos cálculos

Por otra parte si miramos ahora la etiqueta de características técnicas que tienen los hornos de microondas en su parte posterior, encontraremos allí cuál es la frecuencia de las ondas emitidas. Si tenemos en cuenta la expresión que nos indica que la velocidad de una onda es igual al producto de la longitud de onda por la frecuencia, habremos obtenido la velocidad de la onda electromagnética producida, es decir, la velocidad de la luz.

La luz viaja más despacio por el agua que por el aire. En esta foto subacuática la luz viene de arriba, por lo que ha experimentado una notable ralentización en su velocidad. Además, sus componentes rojo y anaranjado tienden a ser absorbidos de inmediato, mientras que el azul puede seguir circulando hasta más lejos. De ahí que bajo el agua todo tienda a verse azulado. Conforme aumenta la profundidad, menor es la luz solar, a mil metros bajo la superficie del mar ya no llega luz solar alguna.



como por sus aplicaciones en tecnología, y serán beneficiosas para nosotros salvo que las recibamos en cantidades excesivas. Ello dependerá, además de la potencia de la fuente emisora de la radiación, del valor del *fotón* de la radiación correspondiente.

El fotón indivisible

Max Planck (1858-1947), famoso físico alemán, fue el primero en introducir el concepto de *cuantificación de la radiación*. Este consiste en suponer que los intercambios de energía se dan en números enteros de una unidad que llamamos *cuanto*. Pongamos un ejemplo de ello: supongamos que una radiación es absorbida por un material, como sucede cuando la luz es absorbida por una película fotográfica, ennegreciéndola. La energía luminosa absorbida no puede ser cualquiera sino un número entero de veces esa unidad de energía que hemos llamado cuanto o, también, fotón, cuando hablamos de luz. Es decir, se pueden absorber 3 o 2333574 fotones, por ejemplo, pero no 3 y medio o 2333574,7. A pesar de todo, la unidad de energía en ese sentido, el fotón, es pequeña en su magnitud, por lo que si tenemos cantidades grandes de radiación la cuantificación no resulta muy significativa. Entre 2773334 y 2773335 fotones hay poca diferencia relativa de energía, pero esta sí es muy importante cuando lo que se intercambian son cantidades pequeñas, como sería el caso si absorbiéramos 3 o 4 fotones. Por ello los conceptos de cuantificación son fundamentales para estudiar la interacción de la radiación con la materia a nivel microscópico. Ello ha dado lugar a esa parte de la física tan actual y fascinante que denominamos *física cuántica*.

También hablamos de fotones en la emisión de radiación. Una lámpara emitirá un número entero de fotones correspondiente a la luz de una determinada longitud de onda. En este punto lo interesante es indicar que la energía del fotón emitido es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación emitida, y por tanto, inversamente proporcional a la longitud de onda. A menor longitud de onda, mayor frecuencia y fotones más energéticos.

Así, serán mucho más energéticos los fotones de rayos X que los de la radiación ultravioleta, y estos más que los de la luz visible. Los menos energéticos serán los de las microondas y las ondas de radio.

Esta es la razón por la que a veces se llama a las radiaciones con fotones muy energéticos, como los rayos gamma y los X, *radiaciones ionizantes*. Los fotones muy energéticos, al interactuar con algunas moléculas a nivel individual, pueden dar lugar a su ionización o separación en sus átomos constituyentes. Un ejemplo de ello es la formación de oxígeno atómico o de ozono por absorción de fotones ultravioletas de alta energía por parte del oxígeno molecular de las capas altas de la atmósfera.

Espectros y diversos tipos de luz

Con anterioridad se indicó que la luz solar era la suma de varias luces de distinto color. Posteriormente hemos visto que, en vez de colores, para describir sus componentes podemos hablar de longitudes de onda. La luz blanca es aquella que contiene luces de un continuo de longitudes de onda y que sumadas generan una luz de color blanco. Es decir, en su composición espectral presenta todas las longitudes de onda entre 400 y 700 nm, y de cada una de ellas tendrá una cantidad de energía determinada.

Si lo que tenemos es una luz que solo emite en un margen muy estrecho de longitudes de onda en torno a una concreta, diremos que estamos ante una luz cuasimonocromática. Por ejemplo, la luz que emite un láser es de este tipo. El láser de helio-neón emite en torno a 632,8 nm, o sea, tiene una emisión de energía muy importante en esta longitud de onda y su emisión decae con rapidez hacia longitudes de onda mayores o menores, por lo que decimos simplemente que emite en los 632,8 nm. Estrictamente, sin embargo, nunca podremos tener una emisión en una sola longitud de onda (*luz monocromática*).

La *luz policromática* es la que está compuesta por luces de distinta longitud de onda pero que no es obligatoriamente de co-

lor blanco. La luz blanca es policromática, pero afirmar que la luz policromática es blanca no necesariamente es correcto. Así, se dice que la luz de una lámpara de incandescencia es amarilla, y si obtenemos su composición espectral, veremos que está formada por luces de todas las longitudes de onda desde 400 a 700 nm y de radiaciones de aun mayor longitud de onda.

Como indicamos al hablar del arcoíris, conseguir la descomposición de una luz policromática en sus componentes espectrales (según longitudes de onda) supone obtener lo que llamamos espectro. Los espectros de luces nos permiten conocer las características de las fuentes que las emiten. De este modo, los astrofísicos, al conseguir el espectro de la luz que llega de una estrella, pueden deducir sus componentes químicos principales, como el hidrógeno, el helio, etc.

EL ESTADO DE POLARIZACIÓN DE LA LUZ

Para explicar la diferencia entre dos tipos de luz, la natural y la polarizada, vamos a volver por un momento a nuestro experimento de la cuerda. Como hemos mencionado, la perturbación que se propaga como una onda es el desplazamiento de los puntos de la cuerda hacia arriba y hacia abajo. Es un desplazamiento vertical, mientras que la propagación de la onda se da hacia delante, por tanto en una dirección perpendicular a la de la perturbación. Se dice entonces que la onda es *transversal* y podríamos definir un plano que llamamos *plano de polarización* como el que contiene a la cuerda y a la dirección de propagación. Este plano puede girar si nuestra mano, que mueve la cuerda, en vez de moverse hacia arriba y hacia abajo, la desplaza de un lado a otro, horizontalmente. Entonces la cuerda se moverá en horizontal y el plano de polarización será igualmente horizontal.

Con la luz pasa algo equivalente. Las ondas electromagnéticas asociadas a la luz son asimismo transversales, pues el campo eléctrico (y el magnético) que se propaga «vibra» en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. En este caso también podemos definir el plano de polarización como

un plano que contenga al campo eléctrico y a la dirección de propagación. Este va a ser un plano o bien vertical o bien horizontal o con una orientación cualquiera. Cuando ocurre esto tenemos lo que se conoce como luz *polarizada plana* o *linealmente polarizada*. Algunas veces se la llama simplemente *luz polarizada*, aunque este término es más amplio que lo expuesto aquí.

La *luz natural* no es necesariamente aquella que recibimos de fuentes de luz naturales, como el Sol o las estrellas. Se trata de un término asociado a la polarización de la luz, o mejor dicho, a la falta de ella. Así, se describe la luz natural como aquella en la que no se puede definir un estado de polarización concreto o aproximado. No podríamos definir un plano de polarización, sino que tendríamos que concebir la luz natural como una mezcla uniforme de luces polarizadas, cada una con un plano de polarización distinto, con todas las orientaciones del mismo igual de probables.

Las fuentes de luz emiten por lo general luz natural. Estas no suelen emitir luz polarizada, y para conseguirla necesitaremos dispositivos artificiales, como los que reciben el nombre de *polarizadores lineales*, o simplemente *polarizadores*, que no están tan alejados de nuestra vida cotidiana. Los llevan algunas gafas de protección solar empleadas para esquiar, y los aficionados a la fotografía conocen la existencia de filtros polarizadores que se colocan delante del objetivo de la cámara para evitar reflejos no deseados en una escena. Estos dispositivos, que tienen la apariencia de un filtro gris, dejan pasar solo luz linealmente polarizada. Es decir, que si incide luz natural sobre ellos, dejan pasar solo la de un plano de polarización determinado, el que coincide con lo que llamamos *línea de transmisión del polarizador*. La luz reflejada por la nieve o la reflejada en una cara y que da lugar a los brillos que el fotógrafo quiere eliminar, puede estar linealmente polarizada. El polarizador se ocupará entonces de no dejar pasar la luz cuyo plano de polarización sea perpendicular a su línea de transmisión, por lo que eliminará el reflejo.

El hecho de que la luz se pueda polarizar ha constituido una de las evidencias más firmes para aceptar un modelo ondulatorio para ella.

ALGO DE HISTORIA

Como hemos podido ver, es posible hablar de la luz como una onda electromagnética o como una sucesión de fotones, de ahí que se suela hablar de su naturaleza dual, la dualidad onda-córpúsculo. Pero ¿cómo se ha llegado a esta conclusión? ¿Cómo varió nuestra concepción de la luz a lo largo de la historia? Una pequeña revisión histórica sobre ello nos mostrará además la forma de trabajar del método científico.

Las primeras teorías

Remontándonos a los orígenes de la civilización, debemos citar el interés que ya despertó en el mundo helénico el fenómeno de la visión. Muchas de las cuestiones que hoy conciernen a la física trataron de explicarse en aquella época dentro de la filosofía natural. Hacia el año 300 a.C., Euclides introdujo el concepto de rayo en su obra *Óptica* (donde se supone erróneamente que es emitido por el ojo), para posteriormente en su *Catóptrica* explicar la visión indirecta producida por la reflexión en un espejo y los postulados geométricos que la justificaban. Se conocían ya las leyes de la reflexión y de la refracción y, a modo de ejemplo, podemos indicar, aunque no es un hecho histórico completamente confirmado, que Arquímedes utilizó la reflexión de la luz para defender Siracusa, su ciudad natal, de la invasión de los romanos. Una serie de escudos metálicos fueron colocados de forma tal que reflejaran la luz solar hacia las velas de los barcos enemigos, consiguiendo así incendiarlos. Este y otros muchos ingenios de Arquímedes hicieron que la conquista de Siracusa por parte romana se convirtiera en una empresa difícil, prolongándose su asedio durante mucho tiempo.

No obstante, hasta trece siglos después la luz no fue aceptada como agente exterior capaz de producir el fenómeno visual. Fue Alhacén quien presentó la teoría de que la luz va del Sol a los objetos, y de estos a los ojos, comportándose como un proyectil. Planteó asimismo la formación de imágenes en la retina. Puede

considerarse pues que con él se inició la óptica fisiológica; de esta forma, la óptica pasó a ser considerada «ciencia de la luz y la visión» en vez de «ciencia de la visión».

Alhacén, o Ibn-al-Haytam, nacido en Basora (Irak) en 965 y muerto en El Cairo (Egipto) en 1040, es contemplado como el mayor representante del renacimiento musulmán del siglo xi. Tenía unos amplios conocimientos en muchos campos de la ciencia, siendo considerado como el iniciador del método científico, ya que realizó sencillos pero rigurosos experimentos para probar sus teorías. Por ello, una de las razones que se tuvieron en cuenta para celebrar en 2015 el Año Internacional de la Luz fue que se cumplían mil años de sus trabajos sobre la óptica y la visión.

A partir del siglo xiii se empezaron a traducir sus trabajos al latín en Europa, los cuales, de modo indirecto, llevaron a Roger Bacon (ca. 1214-1294) a concebir la idea de usar lentes para corregir la visión. Leonardo da Vinci (1452-1519) describió a su vez la cámara oscura, más tarde popularizada por el trabajo de Giovanni della Porta (1535-1615), quien estudió los espejos múltiples y las combinaciones de lentes positivas y negativas en su *Magia Naturalis*.

Es en la edad Moderna (mediados del siglo xvi y principios del xvii) cuando, tras las aportaciones de Kepler y Galileo, puede considerarse que comienza el verdadero desarrollo de la óptica; en esta época se generalizó el uso de lentes, espejos, telescopios y microscopios. En el plano teórico, Descartes publicó en 1637 su *Dióptrica*, estableciendo definitivamente las leyes de la reflexión y la refracción que ya habían sido descubiertas de manera experimental por Snellius en 1621.

Las aportaciones de Della Porta y Galileo en este terreno fueron fundamentales. Galileo ayudó a introducir el método científico, combinando ordenadamente razonamiento y experiencia, lo que permitió no solo descubrir hechos y establecer leyes, sino también plantear hipótesis tratando de explicar e interpretar ta-

Con la ayuda de microscopios, no hay nada tan pequeño que pueda escapar a nuestra investigación.

ROBERT HOOKE

los hechos, elaborando así teorías sobre el comportamiento de la naturaleza. En este contexto surgieron las aportaciones de Newton, Grimaldi, Hooke y Huygens, incorporándose a la óptica nuevos temas, como son los fenómenos interferenciales, de difracción y polarización, que derivaron en la consiguiente disputa sobre la naturaleza corpuscular y ondulatoria de la luz.

El fenómeno de la difracción fue observado por vez primera por Francesco Maria Grimaldi (1618-1663). Robert Hooke (1635-1703) observó también más tarde sus efectos. Hooke fue el primero en estudiar los patrones de interferencia coloreados generados por películas delgadas y concluyó correctamente que estos se debían a una interacción entre la luz reflejada de las superficies frontal y posterior. Propuso la idea de que la luz era un movimiento vibratorio rápido del medio propagándose a una gran velocidad: el comienzo de la teoría ondulatoria. El planteamiento era que la luz podía ser una onda mecánica como el sonido, aunque esto implicaba la necesidad de un medio material para poder propagarse, lo que hizo suponer que allí donde no hubiera nada debía existir al menos un medio material al que se llamó *éter*. Isaac Newton (1643-1727) intentó, sobre observaciones directas, evitar hipótesis especulativas. Pero permaneció ambivalente por un tiempo acerca de la naturaleza real de la luz. ¿Era corpuscular, un flujo de partículas, como algunos sostenían? ¿O era una onda propagándose en un medio que todo lo penetraba, el éter? Newton intentó abarcar ambas teorías, aunque conforme envejecía se fue inclinando hacia la teoría corpuscular, tal vez por el problema de la explicación de la propagación rectilínea en términos de ondas que se dispersaban en todas direcciones. Casi al mismo tiempo que Newton daba énfasis a la teoría corpuscular, Christiaan Huygens (1629-1695) estaba difundiendo ampliamente la teoría ondulatoria, deduciendo las leyes de la reflexión y la refracción mediante ella, y descubriendo la polarización. Pero el gran peso de la opinión de Newton pudo con los partidarios de la teoría ondulatoria.

Esta renació con Thomas Young (1773-1829), quien en los primeros años del siglo XIX se basó en ella para explicar las interferencias. Se seguía suponiendo que la luz consistía en ondas

longitudinales elásticas en analogía al sonido, lo que supuso graves problemas con la polarización, hasta que Young sugirió que podría ser transversal como una onda en una cuerda, tras lo cual Augustin Fresnel (1788-1827) comenzó a desarrollar una descripción mecánica de las oscilaciones del éter. Después de eso, prácticamente no quedaron partidarios de la teoría corpuscular, aunque seguían existiendo problemas, sobre todo derivados de las características que debía tener ese medio material, el éter, necesario para la propagación. Para ello, y dado que la velocidad de propagación de una onda mecánica en un medio material depende de las características de este, se hicieron intentos de medir la velocidad de propagación de la luz y, aunque los resultados distaron de la que hoy conocemos, esta resultó tener un valor muy alto, dificultando entender cómo era ese medio material que se encontraba donde no había nada.

La teoría electromagnética según Maxwell

A pesar de los felices resultados de la teoría ondulatoria, fue necesario hacer tal cantidad de suposiciones adicionales y a veces contradictorias para explicar cada uno de los fenómenos que resultaba incoherente e insostenible sobre el modelo mecánico de vibraciones en el éter.

En esta época, Michael Faraday (1791-1867) había llegado a importantes conclusiones en sus estudios sobre electricidad y magnetismo, y había apuntado la idea de que la luz podría ser de naturaleza electromagnética. James Clerk Maxwell (1831-1879), después de una espectacular síntesis de los trabajos sobre electromagnetismo, llegó por vía teórica a la conclusión de que los campos electromagnéticos de variación rápida se propagaban como ondas, y dio un método para medir su velocidad de propagación en el laboratorio, lo que fue puesto en práctica por R. Kohlrausch y W. Weber en 1856, encontrando que dicha velocidad coincidía muy aproximadamente con la velocidad de la luz, hallada ya por entonces por otros procedimientos. Esto hizo pensar a Maxwell que las ondas luminosas podrían efectivamente

te ser de naturaleza electromagnética, y en este sentido elaboró su teoría, que dio a conocer en 1864.

Esta teoría de Maxwell dio verdadera unidad al modelo ondulatorio y fue confirmada experimentalmente por Heinrich Hertz en 1888, quien por primera vez produjo y detectó ondas electromagnéticas por medio de circuitos oscilantes, observando, como en las ondas luminosas, los fenómenos de reflexión, refracción, interferencias y polarización, sin necesidad de un medio material para su propagación, lo que eliminaba los graves problemas con el éter.

Se concreta la teoría corpuscular

La interpretación ondulatoria de la luz condujo a grandes éxitos en la explicación de fenómenos luminosos tales como las interferencias o la difracción. Sin embargo, paradójicamente, existe otro tipo de experimentos que sugieren que la luz está formada por partículas. Históricamente fue Max Planck en 1900, al estudiar la radiación del *cuerpo negro* (objeto ideal que absorbe toda la radiación que incide sobre él), el primero que sugirió una cuantización de la energía luminosa, de acuerdo con la cual esta debería ser siempre un múltiplo entero de hf . Aquí f representa la frecuencia de la onda electromagnética considerada y h es una nueva constante fundamental llamada *constante de Planck*: $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Posteriormente, en 1905, Einstein propuso que la radiación electromagnética estaba conformada por partículas sin masa, que fueron bautizadas con el nombre de fotones, transportando cada una de ellas una energía hf , lo que le permitió explicar el efecto fotoeléctrico (emisión de electrones cuando en un material incide radiación electromagnética) de una forma sencilla y elegante. En consecuencia, para una luz monocromática todos los fotones son iguales entre sí. Más adelante, en 1924, el *efecto Compton* permitió demostrar de manera fehaciente la existencia de los fotones. En general, una onda electromagnética cualquiera puede ser descompuesta por análisis de Fourier en una suma

de ondas planas o modos con distintas frecuencias. En este caso, la radiación está compuesta por fotones de diferentes frecuencias, y por tanto energías, correspondientes a los modos que intervienen en la suma.

El principio de indeterminación

La posibilidad de caracterizar la luz como paquetes discretos de energía reside en nuestra capacidad para establecer, en un instante dado, la posición y cantidad de movimiento (producto de la velocidad de un cuerpo por su masa) de un fotón determinado, ya que estas magnitudes se consideran como propiedades medibles de una partícula material. Sin embargo, Werner Heisenberg (1901-1976) demostró que, para las partículas de dimensiones atómicas, es imposible determinar simultáneamente ambas magnitudes con total precisión. Si se diseña un experimento para medir una de ellas exactamente, la otra resulta totalmente indeterminada, y viceversa. Un experimento puede medir ambas, pero solo dentro de ciertos límites de precisión. Estos límites quedan fijados por el *principio de indeterminación*, según el cual:

$$\Delta p \cdot \Delta x \approx h \quad \text{o} \quad \Delta E \cdot \Delta t \approx h,$$

donde Δp y Δx representan las variaciones de la cantidad de movimiento y de la posición de la partícula, respectivamente, es decir, las indeterminaciones de estas magnitudes.

El principio de complementariedad de Bohr

En 1928 Niels Bohr enunció el *principio de complementariedad*, según el cual las descripciones ondulatoria y corpuscular son simplemente modos complementarios de considerar el mismo fenómeno. Esto es, para obtener la descripción completa necesitamos ambas propiedades, pero debido al principio de incertidumbre, es imposible idear un experimento que las muestre

a la vez con todo detalle. Un experimento cualquiera mostrará o bien el carácter corpuscular o bien el ondulatorio, dependiendo del propósito para el que haya sido diseñado.

La luz tiene carácter dual

Admitida la veracidad de los principios de incertidumbre y de complementariedad, ¿qué puede decirse sobre la naturaleza de la luz? En primer lugar, es importante comprender que la luz es esencialmente más primitiva y sutil que los fenómenos mecánicos macroscópicos. Toda información sobre ella ha de obtenerse indirectamente. Existe, por tanto, la posibilidad de que no fuera factible describir la luz en los términos que nos son habituales en la vida diaria.

Dado que la complementariedad desecha cualquier experimento en el que puedan medirse ambas características a la vez, la conclusión es que están igualmente justificados los conceptos de fotones y ondas y que cada uno es aplicable en su propio entorno.

Así, a medida que avancemos en el espectro electromagnético aumentando la frecuencia, más importancia tendrá el carácter corpuscular y menos el ondulatorio. O, dicho de otra forma, al aumentar la frecuencia, la energía del fotón asociado será mayor, mientras que si la frecuencia es pequeña, la energía del fotón será mucho menor. Por ello hablamos de «las ondas de radio» y no de fotones, sucediendo lo contrario en la otra parte del espectro electromagnético. En el caso de la luz visible, su comportamiento en los fenómenos que habitualmente observamos se explica con precisión con la teoría ondulatoria.

La *relación* entre el aspecto ondulatorio y el corpuscular de la luz viene dada por la constante universal de Planck, h . Esta constante es el producto de una variable característica de la onda, la longitud de onda, λ , y otra de la partícula, la cantidad de movimiento (o momento) p . Así

$$h = p\lambda.$$

La evolución histórica de la ciencia óptica que se acaba de esbozar ha ido dotándole de contenido. Por ello, con el transcurso del tiempo, sus definiciones han sido variadas: las antiguas suelen situar el fenómeno de la visión y la «luz» (en el sentido de ondas visibles) en un lugar central o muy señalado; en cambio, en definiciones más modernas, como la aceptada en 1961 por la Sociedad Estadounidense de Óptica («Óptica es la ciencia que trata de la energía radiante, su generación y propagación, los efectos que sufre y produce y todos los fenómenos estrechamente relacionados con ella»), aparece claramente una ampliación del concepto de óptica, al considerar la energía radiante en general y no solo la pequeña parte capaz de producir sensación visual. Asimismo resulta evidente el interés en especificar que ya no solo se consideran como centro básico los fenómenos de propagación, sino también los de generación y detección de dicha energía radiante.

Fuentes de luz e iluminación

La luz permite que veamos y realicemos la gran mayoría de nuestras actividades cotidianas. En ausencia de luz solar necesitamos disponer de fuentes de luz artificial, por ejemplo en interiores, o de noche. Un buen uso de estas fuentes resulta fundamental por motivos de ahorro energético y para evitar la contaminación lumínica.

El ser humano siempre ha tenido la gran necesidad de producir luz, fundamentalmente para iluminar su entorno y así poder seguir desarrollando su vida cuando no dispone de aquella proporcionada por el Sol. En efecto, la luz es necesaria en cada momento de nuestra actividad cotidiana: basta con plantearnos cómo sería nuestra vida sin luz artificial. La iluminación desempeña un papel importantísimo en nuestra sociedad desde cualquier punto de vista. Por ello, es muy comprensible que hayamos buscado siempre la mejor forma de iluminar, fabricando fuentes cada vez mejores que nos ayuden a cubrir las necesidades que han ido surgiendo.

Hoy en día disponemos de una inmensa cantidad de fuentes lumínicas con las que satisfacer cualquier situación que lo requiera. Sin embargo, sigue habiendo retos que deben ser abordados entre todos y de forma urgente. Por una parte, por motivos medioambientales debemos trabajar para ahorrar todo lo posible en iluminación; por otra, un uso irracional de esta lleva a un problema cada vez mayor: la contaminación lumínica. Estos dos grandes retos están íntimamente relacionados y deben ser abordados en todos los niveles de nuestra sociedad, desde las clases dirigentes, promoviendo medidas al respecto, hasta cualquiera

de nosotros, pues nuestra conciencia y actuación son esenciales, por insignificante que ello nos pueda parecer.

LOS DIFERENTES PROCESOS QUE PRODUCEN LUZ

La luz siempre se genera a través de la transformación de algún tipo de fuente energética en energía radiante, mediante un proceso que recibirá distintos nombres según cuál sea la energía de partida. Pueden considerarse tres procesos generales para ello: *piroluminiscencia*, *incandescencia* y *luminiscencia*.

Piroluminiscencia, el procedimiento más antiguo

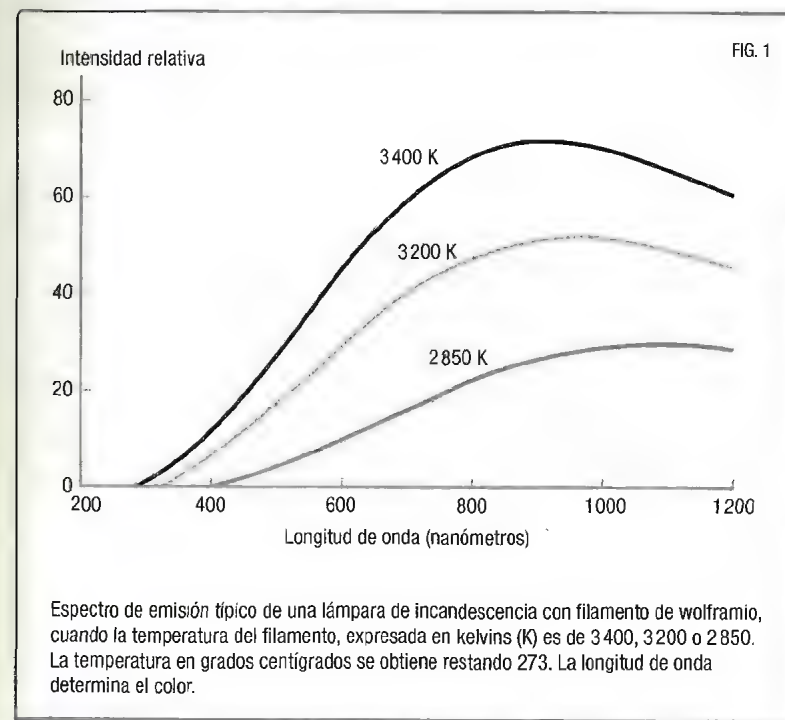
La piroluminiscencia es la obtención de luz mediante la combustión de un material, generalmente un compuesto de carbono, en el aire. Este proceso es el que primero se utilizó, y ya los hombres prehistóricos de la Cueva de Altamira (España) utilizaban *candilejas* hechas a base de tuétano de hueso, que tienen la gran ventaja de no producir humo. El fuego, además de producir calor, fue la primera fuente de luz artificial y la única utilizada a lo largo de muchos siglos de historia. Era fácilmente controlable, permitía regular la cantidad de luz que generaba y se podía transportar si era necesario. Aprender a crear y manejar la combustión de un gas o un líquido de forma controlada para generar luz aportó muchas ventajas al ser humano. No obstante, la cantidad de luz producida era pequeña y solo permitía realizar tareas visuales en las proximidades de la fuente. Actualmente, su uso es muy limitado y prácticamente anecdótico. Aun así, es probable que muchos de nosotros sigamos teniendo en nuestras casas alguna vela.

El gran avance de la iluminación por incandescencia

En el proceso de incandescencia la luz se obtiene por agitación térmica de los átomos del material con que está hecho un fila-

mento, que se comporta como un radiador térmico. Como en todos los radiadores térmicos, la *excitancia radiante espectral*, o cantidad de energía emitida por unidad de tiempo y unidad de área de la fuente, es función de la temperatura. La emisión de estas fuentes (figura 1) se aproxima a la del radiador térmico más conocido, llamado *cuerpo negro ideal*. Esta fuente no tiene existencia real, sino que es una construcción teórica, que permite relacionar mediante una expresión matemática la excitancia espectral radiante del mismo con la temperatura a la que se supone que se encuentra. Por ejemplo, para el cuerpo negro, el máximo de emisión espectral se encuentra a una longitud de onda menor cuanto mayor es la temperatura.

Las lámparas de incandescencia emiten de forma muy parecida al cuerpo negro ideal a una temperatura de 2854 K. En ellas, el elemento fundamental es el filamento que se lleva a la incan-



desciende por el paso de una corriente eléctrica y, dado que este duraría muy poco tiempo si estuviera en contacto con el aire, es necesaria una ampolla de vidrio para aislarlo. Los filamentos suelen ser de wolframio, metal de elevado punto de fusión (3378 °C) al que también llamamos tungsteno. Muchas lámparas de incandescencia se han construido colocando en la ampolla un gas halógeno, lo cual protege y hace más duradero el filamento. Las lámparas de incandescencia han entrado en desuso debido a que emiten mucha radiación infrarroja, que no nos sirve para ver, lo que implica un muy bajo rendimiento luminoso, desperdiciando mucha electricidad.

Luminiscencia, otro paso adelante

La luminiscencia es la emisión de radiación óptica por átomos o moléculas de un material, originada por la excitación de estos por diversas formas de energía, excluyendo la de agitación térmica. Quizá el mejor ejemplo de este proceso lo podamos encontrar en la naturaleza: durante algunas tormentas es posible observar cómo se ilumina el cielo con un rayo, cuando la descarga eléctrica excita los electrones, que luego emiten luz al desexcitarse.

Pueden considerarse distintos tipos de procesos de luminiscencia, como la *quimioluminiscencia* (producida por una reacción química), la *bioluminiscencia* (una quimioluminiscencia que se produce en algunos seres vivos; véase la imagen inferior de la página contigua), la *triboluminiscencia* (producida por ciertas tensiones mecánicas), la *radioluminiscencia* (provocada por las partículas liberadas por la radiactividad natural), la *catodoluminiscencia* (por el choque de electrones contra un *luminóforo*, por ejemplo en los televisores antiguos), la *electroluminiscencia* (la acción de un campo eléctrico con un gas o en un sólido), o la *fotoluminiscencia* (por absorción de radiación óptica). De esta última se suelen distinguir dos tipos: *fluorescencia* y *fosforescencia*. Estos dos últimos conceptos presentan un interés especial para nosotros, por lo que los describiremos brevemente.



La antorcha (arriba) es uno de los sistemas de iluminación más antiguos creados por la humanidad. A la izquierda, pólipos bioluminiscentes, investigados por el equipo de Viatcheslav N. Ivanenko, de la Universidad Estatal Lomonosov en Moscú, Rusia.

La mayoría de las sustancias que absorben radiación ultravioleta o visible la convierten en calor. Sin embargo, hay otras que en parte la absorben y en parte la reemiten en forma de radiación de longitud de onda más larga que la absorbida. Por ejemplo, absorbiendo ultravioleta y reemitiendo luz azul. Esta reemisión puede darse de forma inmediata, diciéndose entonces que la sustancia es fluorescente y que se ha producido un fenómeno de fluorescencia; o puede tardar un cierto tiempo en producirse, en cuyo caso tendremos un proceso de fosforescencia. Por tanto, la diferencia fundamental entre ambos procesos radica en el tiempo transcurrido entre la absorción y la reemisión. En el caso de la fluorescencia es inmediato y en el caso de la fosforescencia transcurre un determinado tiempo, de forma tal que podemos decir que los materiales fosforescentes emiten en la oscuridad.

Cerca de nosotros tenemos ejemplos de materiales fluorescentes y fosforescentes. Los tubos fluorescentes para la iluminación de interiores están recubiertos de una pintura fluorescente que reemite la emisión del gas que hay en su interior. Es decir, mediante una descarga de corriente eléctrica se consigue excitar el gas y que este emita. Después, la radiación emitida es absorbida por la pintura fluorescente y esta la reemite a su vez. Otro ejemplo en el que se aprecia la fluorescencia lo hallamos en las discotecas, donde el contenido en ultravioleta de las lámparas que allí a veces se usan es absorbido por el flúor depositado en nuestros dientes por algunas pastas dentífricas o por la fibra de algunos tejidos. Estos materiales se hacen fluorescentes y provocan que percibamos los dientes o una camisa blanca especialmente luminosos, con una cierta tonalidad azul.

Las sustancias fluorescentes podemos descubrirlas fácilmente iluminándolas con una fuente de luz que emita en el ultravioleta. Observemos, por ejemplo, una botella de tónica (la tónica contiene quinina, que es la sustancia fluorescente) iluminada con nuestra luz convencional, y después hagámoslo con la fuente ultravioleta. La veremos entonces como si estuviera turbia.

Los materiales fluorescentes se emplean habitualmente como sistema de seguridad de determinados documentos o de dinero.

En nuestra propia billettera encontraremos algunos ejemplos, sin más que iluminar con una fuente de luz ultravioleta. Si la hacemos incidir sobre un billete observaremos puntos iluminados, normalmente verdes, que no se notan cuando lo miramos bajo una fuente de luz visible. Análogamente, si iluminamos nuestro permiso de conducir con la lámpara ultravioleta aparecerá probablemente el logotipo del organismo competente. Estos son algunos de los métodos que suelen utilizarse para evitar su falsificación.

Si queremos mostrar y entender de manera sencilla el proceso de la fluorescencia, nos bastarán unos materiales de uso cotidiano, en este caso un puntero láser verde y aceite de girasol. Este último, al igual que otros aceites vegetales, como los de oliva, de soja o de maíz, contiene *fluoróforos*, es decir, componentes naturales fluorescentes. Lo único que tenemos que hacer es verter en un vaso transparente el aceite de girasol y hacer incidir sobre él la luz de nuestro puntero láser; observaremos entonces la trayectoria seguida por la luz en el interior del aceite, pero la veremos de un color anaranjado, pues el aceite absorbe la luz verde y la reemite en una longitud de onda mayor.

Se pueden observar fosforescencias en las pinturas con las que vienen marcadas las manecillas de algunos relojes, en elementos decorativos (estrellitas, etc.) y de señalización. Este último aspecto es el más importante desde un punto de vista práctico, ya que los carteles realizados con estos materiales pueden ayudarnos a encontrar la ruta en una emergencia, para lo cual están colocados indicando las puertas de salida, o las escaleras. Con el mismo fin suelen colocarse dos cintas de material fosforescente en el pasillo de los aviones, marcándonos así el camino a seguir en caso de necesidad.

LOS TIPOS DE LÁMPARAS Y SUS CARACTERÍSTICAS

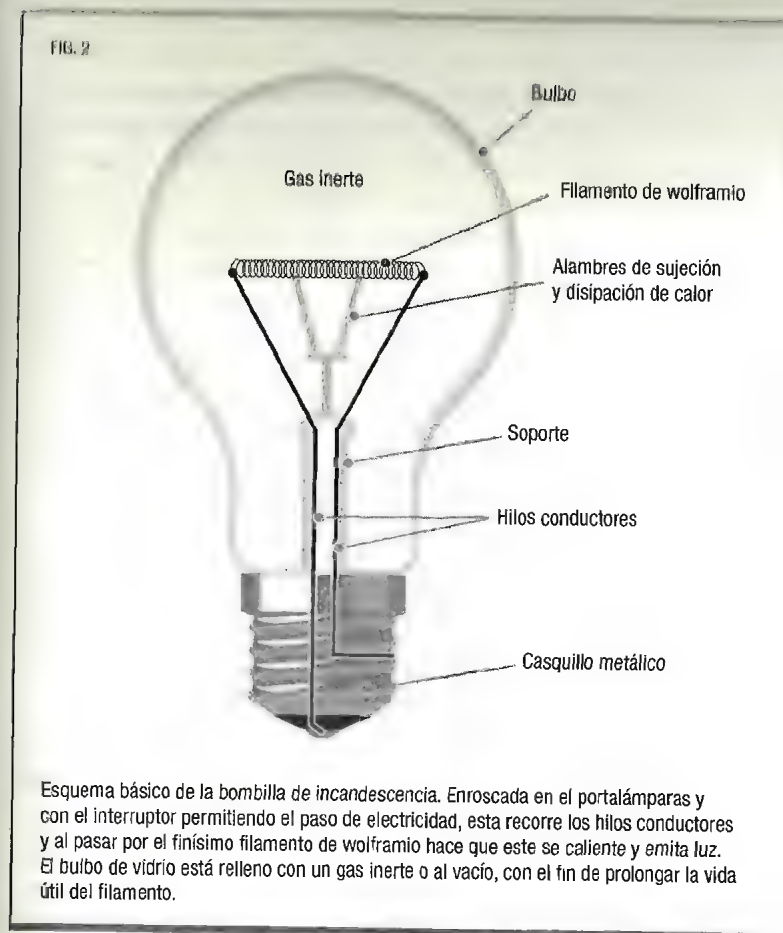
Una lámpara que vayamos a utilizar en iluminación debe poseer ciertas características cuya importancia dependerá de para qué y en qué lugar se la vaya a usar. Si habláramos de una lámpara

ideal, esta debería cumplir muchas condiciones: eficacia muy alta (cuanto más próxima al límite teórico, que es de 683 lm/W, mejor); vida media muy larga; emitir luz blanca y que su índice de rendimiento de color sea 100 (esto supone que el color de un objeto se vea igual que si estuviera iluminado con luz natural, mientras que si su valor es menor puede implicar una variación significativa del color observado); que su emisión sea constante a lo largo de su vida; y otras, quizá menos importantes, como: conexión directa a la red eléctrica, tamaño reducido o encendido instantáneo. Sin embargo, conseguir esa «lámpara ideal» no es tan fácil, a pesar de que no se han escatimado esfuerzos a lo largo de la historia para lograrlo.

Lámpara de incandescencia, la revolución en el siglo xx

Hasta finales del siglo xix, las fuentes de luz de las que disponía el ser humano se basaban exclusivamente en el fenómeno de la combustión. La idea de utilizar energía eléctrica como base para obtener luz surgió cuando Humphry Davy consiguió en 1802 poner en estado incandescente un filamento de platino utilizando una batería galvánica. Las experiencias se fueron sucediendo hasta que, en 1879, Joseph Swan y Thomas Edison, casi simultáneamente y por separado, obtuvieron las primeras lámparas eléctricas de uso práctico.

A partir de entonces, el avance de la técnica de transformación de energía eléctrica en luz ha sido incesante, permitiendo la mejora de las lámparas de incandescencia y siendo estas fundamentales para la iluminación durante el siglo xx. Las características principales de este tipo de lámparas (figura 2) son: una vida media que va desde las 2 000 horas en las lámparas con halógenos a las 1 000 en las que no los tienen; una eficacia luminosa de 20-24 lm/W para las primeras y algo menor, 12-18 lm/W, para las segundas; y, además, la posibilidad de su fabricación en múltiples potencias, formas y tamaños. Sus ventajas podríamos resumirlas en que poseen una emisión estable y con amplia distribución espectral, permiten simular la emisión del cuerpo negro



hasta temperaturas de 3 500 K, y su vida media es independiente de los ciclos de encendido, siendo este instantáneo.

Sin embargo, presentan también inconvenientes muy significativos: el más importante es su elevada emisión de radiación infrarroja (aproximadamente el 85%), lo que les lleva a tener una muy baja eficacia luminosa, además de una vida media bastante baja. Esto ha hecho que actualmente se las haya retirado casi por completo del mercado, y tan solo se fabrican y utilizan para usos muy concretos y especializados.

La eficiencia de la lámpara de descarga

Que se aprendiera a controlar las descargas eléctricas y a restringirlas en un entorno pequeño hizo que apareciera una nueva fuente de luz conocida como *lámpara de descarga en gases*.

Este tipo de lámpara es la más eficiente en generación de luz de alta potencia y por ello se usa en la iluminación de exteriores,

como carreteras, polideportivos, etc.

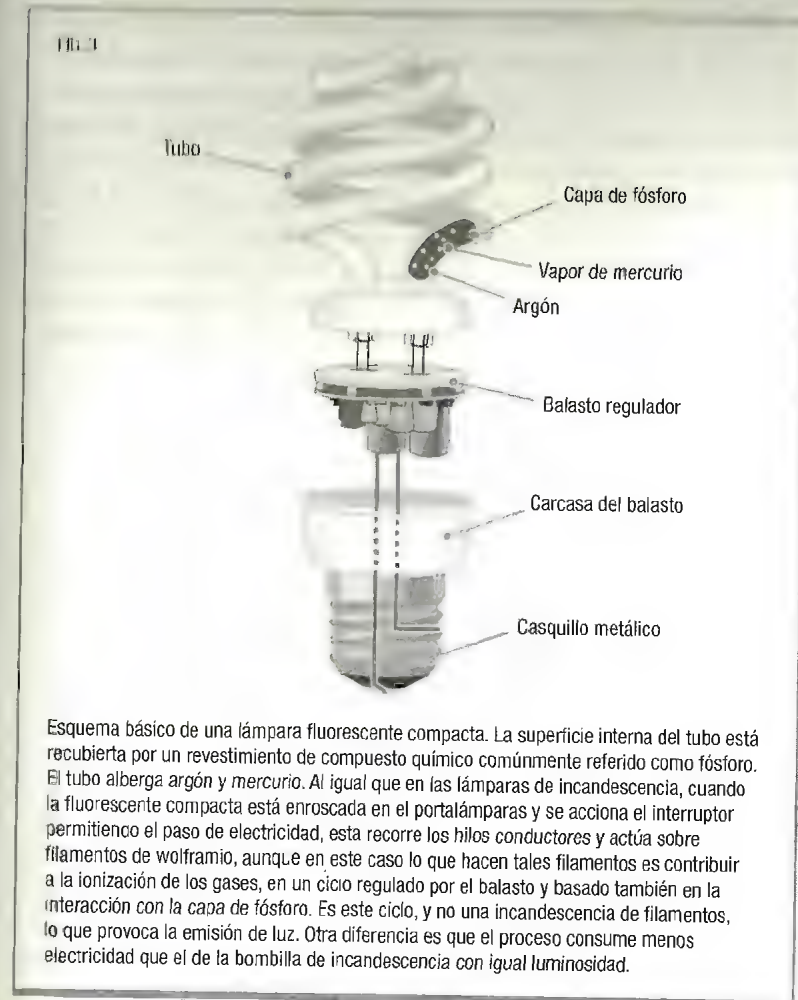
El aspecto, o el color de la luz producida por estas fuentes, depende del medio (gas) en el que se produce la descarga eléctrica. Generalmente en estos medios no se produce luz de

El valor de una idea reside
en el uso que hagamos de ella.

THOMAS A. EDISON

todos los colores, por lo que su uso directo tiene un rendimiento cromático pobre, es decir, no reproducen bien toda la gama de colores de los objetos. Para mejorar este aspecto, se utilizan materiales fluorescentes adheridos a la pared de la cavidad en la que se produce la descarga, de manera que la radiación de fluorescencia se añade a la de la descarga eléctrica en el gas, produciendo así luz en un intervalo espectral más amplio y mejorando el rendimiento cromático de estas fuentes luminosas, sin llegar a la calidad de las lámparas de incandescencia.

Las lámparas de descarga con material fluorescente en el bulbo son muy habituales en todos los ambientes interiores. Las más antiguas se conocen como tubos fluorescentes, o fluorescentes simplemente, debido a la forma cilíndrica de la cavidad que contiene el gas (mercurio), que es también la superficie emisora. Posteriormente se hicieron de tamaños y formas muy diferentes, conociéndose como lámparas fluorescentes compactas (figura 3) o como lámparas de bajo consumo, haciendo referencia a su menor consumo de electricidad comparado con el de las lámparas de incandescencia. La eficacia luminosa de estas fuentes es, por tanto, mayor que la de las lámparas de incandescencia, pues producen una cantidad de luz similar a estas con un consumo eléctrico del orden del 20%. Además, la investigación en productos químicos fluorescentes ha hecho que se disponga de distintos tipos de «fósforos» que, en función



del elegido, producen emisiones significativamente diferentes, lo que ha permitido que su utilización se haya generalizado. Se pueden encontrar con una emisión más blanca (que suele ser catalogada como fría) o más anaranjada, que proporciona una iluminación más cálida.

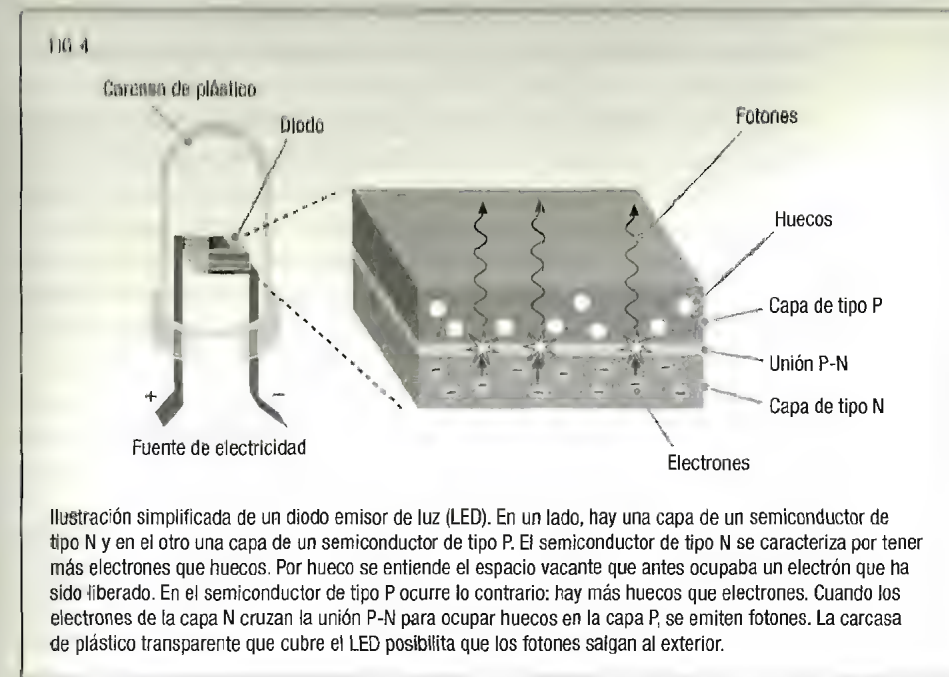
Con estos tipos de lámparas, desde el punto de vista exclusivo de la iluminación, podía afirmarse que se disponía de un gran

producto, pues sus características mejoraban muy significativamente las de las lámparas de incandescencia. Sin embargo, el uso de mercurio como gas de excitación hace que esté previsto dejar de utilizarlas cuando puedan ser reemplazadas de forma fiable por otras fuentes de luz, ya que estamos ante una sustancia tóxica. De hecho, la Unión Europea ya ha prohibido su fabricación y, progresivamente, irán desapareciendo del mercado. Se hace imprescindible aquí que recomendemos encarecidamente que cuando las vayamos eliminando de nuestro entorno no las tiremos a la basura, sino que las llevemos a un lugar especializado para que se reciclen de forma adecuada.

Lámparas LED: el dispositivo ideal

Un *diodo emisor de luz* (LED, por sus siglas en inglés) es un dispositivo microelectrónico en el que se produce una excitación de electrones al hacer pasar una corriente eléctrica. Los electrones no pueden permanecer excitados permanentemente, y al volver a su estado normal generan luz. Este fenómeno físico se conoce como electroluminiscencia. Por tratarse de una emisión por desexcitación de electrones, el espectro de emisión no ocupa todo el intervalo visible, sino una banda relativamente estrecha. Esto, unido al menor consumo eléctrico, hace que las lámparas LED (figura 4) sean más eficaces en la producción de luz que las de incandescencia y las fluorescentes compactas, motivo por el cual están sustituyendo a ambas en los sistemas de iluminación.

Si se tiene en cuenta que, aproximadamente, el 19% de la electricidad producida a nivel mundial se emplea en iluminación, se entiende que la Unión Europea haya puesto un gran interés en mejorar la eficacia de las fuentes que se utilizan en su territorio para alumbrar. La Agencia Danesa de la Energía ha publicado un informe donde se dice que si la prohibición de vender lámparas poco eficientes (todas excepto los LED) hubiera comenzado en 2016, el consumo eléctrico se vería reducido en 79 teravatios-hora (TWh) y supondría un ahorro de 15 800 millones de euros para el conjunto de la UE en los siguientes diez años.



Los primeros LED se empezaron a usar en la década de 1960. Emitían en la zona roja del espectro visible y se usaron como indicadores (*on/off*, encendido/apagado), controles remotos o en señales de tráfico fundamentalmente, pues no emitían suficiente cantidad de luz para otros usos. Posteriormente se fueron desarrollando en el infrarrojo y en longitudes de onda más cortas (amarillos y verdes), por lo que creció su utilización.

Para que una fuente de luz sea interesante en el campo de la iluminación debe ser capaz de reproducir la gama cromática de la forma más amplia posible, por lo que se necesita que emita en las regiones roja, verde y azul, cuando menos. Por ello, la aparición de LED que emitían en la región azul del espectro y con una potencia suficientemente alta es lo que ha permitido su utilización en el campo de la iluminación. La importancia de este descubrimiento queda avalada por la concesión del premio Nobel en el año 2014 a sus descubridores, Isamu Akasaki e Hiroshi

Amano (de la Universidad de Nagoya en Japón) y Shuji Nakamura (de la Universidad de California en Santa Bárbara, en Estados Unidos).

Los dispositivos LED que se usan en el campo de la iluminación, como los que se tienen en casa, son algo más que un simple «chip LED». Los hay esencialmente de dos tipos: los que combinan un LED rojo, otro verde y otro azul (trícromáticos), generando así luz policromática, y los que tienen un chip azul y un recubrimiento fluorescente, parecido al de los tubos fluorescentes o lámparas de bajo consumo, para generar luz policromática, conocidos como LED blancos. En estos LED blancos, poniendo fósforos diferentes se puede variar el aspecto cromático modificando la relación entre la potencia emitida en la zona azul y la emitida en la zona de la banda de fluorescencia, consiguiendo así que la luz generada sea más o menos «cálida». Dado que toda su emisión se produce en el intervalo visible, la eficacia luminosa de los LED es muchísimo mayor que la de las lámparas de incandescencia.

Además del «chip LED» y del recubrimiento en el que se deposita el material fluorescente, estas fuentes de luz tienen un sistema de transformación de la corriente y otro de disipación de calor, ya que con altas temperaturas disminuye significativamente su eficiencia. Por tanto es más correcto llamar a estos dispositivos «lámparas LED».

La emisión de los LED no se produce por igual en todas las direcciones, sino que existe un rango de direcciones privilegiadas, un rango menor que el de las lámparas de bajo consumo.

En definitiva, los tipos de fuentes que se usan en cada caso dependen del objetivo que se pretenda alcanzar. Con solo mirar a nuestro alrededor podremos descubrir que el número de elementos disponible es bastante elevado.

LA NECESIDAD DE ILUMINAR ADECUADAMENTE

Con la luz natural procedente del Sol tenemos una iluminación ideal que nos permite llevar nuestra vida cotidiana en las mejo-

res condiciones. Por ello, cuando iluminamos con luz artificial debemos intentar conseguir esas mismas condiciones ideales que nos proporciona la luz natural. Iluminar de forma adecuada depende, fundamentalmente, de la estancia que queramos iluminar y de la tarea visual que se pretenda desarrollar. Es el primer paso para que esa tarea se desarrolle correctamente. Para determinar la calidad y cantidad del alumbrado deben tenerse en cuenta una serie de parámetros: nivel de iluminación, riqueza cromática, distribución de las lámparas en el campo visual, deslumbramiento, modelado y estética.

El estudio de los tres últimos parámetros se sale de nuestras pretensiones, por lo que no los abordaremos aquí, pero sí trataremos, muy brevemente, los tres primeros.

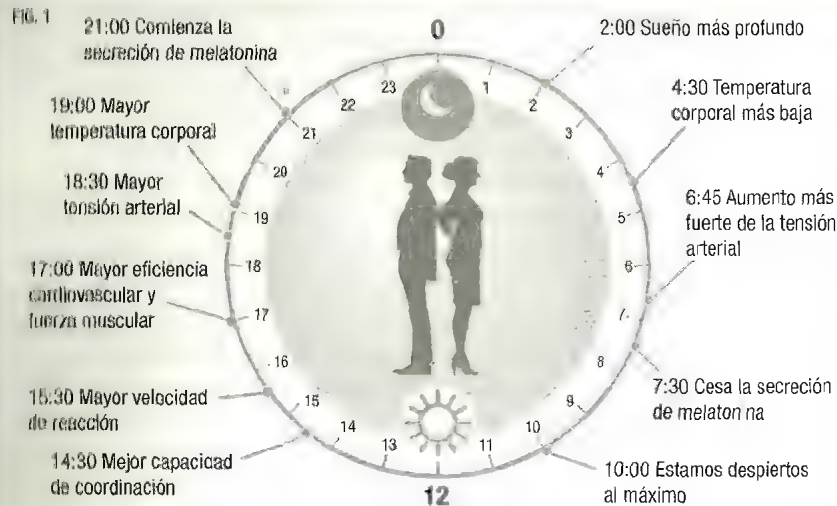
El nivel de iluminación o iluminancia nos habla de la cantidad de luz que debemos tener. Su unidad de medida es el *lux* (lx) y podemos medirlo con un luxómetro. El tipo de tarea a desarrollar y la estancia en la que se desarrolle irán fijando los valores mínimos o el intervalo en el que debe encontrarse este parámetro. Así, por ejemplo, si se trata de iluminar una zona de circulación, el valor mínimo que necesitamos es el necesario para distinguir los rasgos de un rostro humano, lo que supone una iluminancia de unos 20 lx. Al ir aumentando las exigencias de la tarea este valor irá creciendo paulatinamente. En locales de trabajo donde se permanece mucho tiempo su valor mínimo debe ser del orden de 200 lx; en el puesto de un alumno, en la escuela, dicho valor deberá alcanzar ya unos 300 lx y unos 500 lx cuando se desarrolla una labor de estudio. Si se trata de tareas de precisión, piénsese por ejemplo en un quirófano, el nivel de iluminación deberá ser muy superior, del orden de 20 000 lx, ya que así se consigue una máxima sensibilidad de contraste.

Evidentemente, disponer del nivel mínimo de iluminación recomendado es muy importante, por razones que van desde nuestra salud hasta el rendimiento en la tarea que se quiera realizar; sin embargo, excedernos puede suponer un gasto innecesario de energía.

La colocación de las lámparas es también un aspecto muy importante a considerar, y sin entrar a analizar el tema en profun-

LA LUZ CONTROLA NUESTRO RITMO CIRCADIANO

El cuerpo humano tiene una serie de ritmos circadianos que regulan sus funciones, pero no siempre los seguimos. Por eso, a veces, cuando vamos a dormir, nos cuesta mucho hacerlo. Esto se debe a que nuestro cuerpo tiene un reloj interno que regula los ritmos circadianos, que regulan un ciclo de 24 horas y que se repite una y otra vez. Este reloj interno, que se encuentra en el núcleo supraquiasmático del hipotálamo, es el que regula los ritmos circadianos. La luz es el principal factor que regula este reloj. Cuando estamos expuestos a la luz, el reloj se sincroniza con el ciclo de 24 horas. Si no estamos expuestos a la luz, el reloj se desajusta y podemos tener problemas para dormir. Por eso, es importante exponerse a la luz natural durante el día y evitar la luz artificial por la noche. Esto nos ayudará a mantener un ritmo circadiano saludable y a dormir mejor.

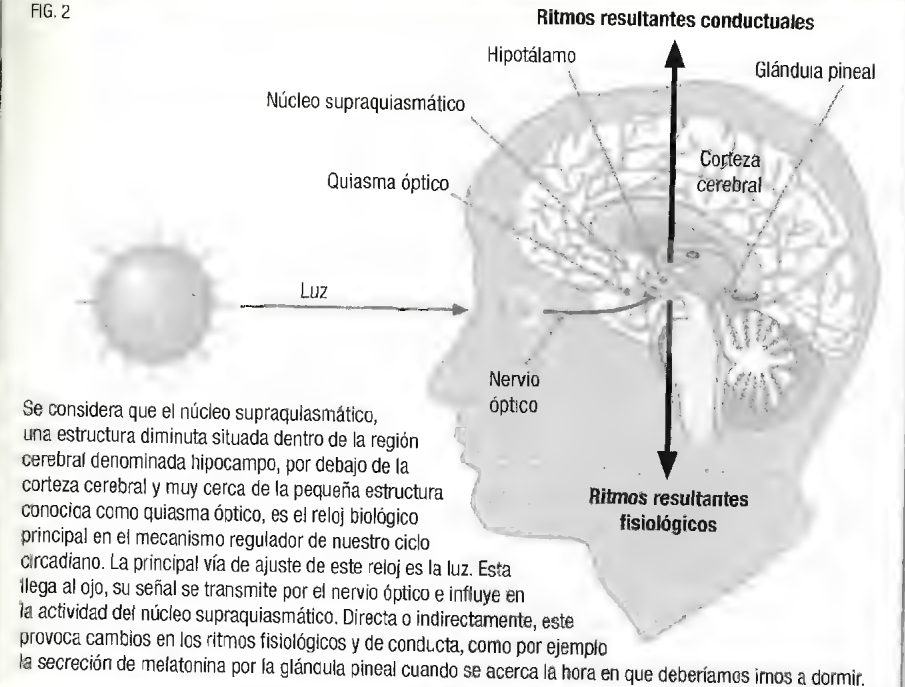


En condiciones naturales, con la luz solar como principal influencia lumínica, este es el horario aproximado que tiende a seguir el cuerpo humano en algunas de sus funciones fisiológicas y estados. Para gente habituada a trabajar de noche y dormir de día, el horario presentará alteraciones. Lo mismo sucede en habitantes de latitudes muy altas, donde la luz solar no sigue el ciclo de 24 horas del resto del mundo. Por otra parte, la costumbre, hoy en día muy habitual, de irse a dormir bastante después de ponerse el Sol, también tiende a distorsionar este horario natural.

Los efectos de la melatonina

Entre muchos los factores que pueden afectar al ritmo circadiano, y van desde la temperatura ambiental hasta la dieta, pero quizás el que más lo determina es la luz. Nuestro ritmo se ha sincronizado con la luz natural que nos llega del Sol para que realicemos la gran mayoría de nuestras tareas diurnas cuando está disponible, y para que descansemos, de noche, cuando no hay luz (figura 2). Todo esto se debe en buena parte a la liberación nocturna de una hormona, la melatonina, que nos produce una sensación de sueño, mientras que durante el día su liberación es mínima. Esta hormona posee un potente efecto antioxidante y antiinflamatorio y nos protege de alteraciones que provocan obesidad y diabetes, entre muchos otros trastornos. Hay bastantes datos que indican que la liberación de la melatonina depende de la luz que nos llega y, más concretamente, de su composición espectral, ya que parece que las bajas longitudes de onda del espectro visible, azules, son las que más le afectan. Por todo ello, si buscamos una iluminación idónea debemos también tener en cuenta sus efectos sobre el ritmo circadiano. Una iluminación muy brillante de noche, sobre todo si es rica en luz azul, contribuirá a desvelarnos y es desaconsejable si queremos conciliar el sueño de inmediato.

FIG. 2



didad, podemos plantear unos ejemplos que nos permitan hacer nos una idea de lo que supone.

A la hora de iluminar nuestra casa, las consideraciones estéticas desempeñan un papel esencial, pero no debemos olvidar que la iluminación es algo más que eso, sobre todo en aquellas zonas de nuestro hogar en las que realizamos tareas delicadas o que requieren un cierto detalle.

En el baño, la zona que vamos a usar para maquillarnos, afeitarnos, etc., debe estar correctamente iluminada, y sin embargo no siempre se colocan las fuentes de luz de forma apropiada. La luz debe iluminar el objeto, nosotros, sin generar sombras ni deslumbramientos. Es un error bastante extendido suponer que la iluminación debe dirigirse hacia el espejo, o colocar las lámparas de tal forma que producen deslumbramiento en la persona que se acerca a él.

Algo similar suele pasar en la cocina. Si tenemos solo una iluminación general, por buena que sea esta, es muy probable que tengamos sombras en la zona de trabajo, muchas veces generadas por nosotros mismos, las cuales pueden hacer que, precisamente en la zona en la que más necesaria es, dicha iluminación no sea adecuada. Afortunadamente, cada vez se tiene más en cuenta esto y prácticamente todas las cocinas montadas en exposiciones cuentan con una iluminación adicional en dichas zonas.

Consideremos un tercer y último ejemplo. Para estudiar, leer y tareas similares, debemos tener un buen nivel de iluminación, de ahí que sea habitual disponer de un flexo que lo mejore en la zona de trabajo. Ahora bien, ¿debemos mantener encendida la luz general o debemos apagarla una vez encendido nuestro flexo? Si solo tenemos encendido este último habrá una gran diferencia de iluminación de unos puntos a otros, un gran contraste entre el libro o el papel sobre el que trabajemos y cualquier otro punto que observemos al levantar la mirada de nuestro texto. Este alto contraste genera malestar, produciendo habitualmente un cierto cansancio, por ello, lo más adecuado es que al estudiar encendamos nuestro flexo pero mantengamos encendida la lámpara general.

Con el segundo parámetro, la «riqueza cromática», queremos indicar que la iluminación que coloquemos debe conseguir la

máxima gran riqueza cromática que tiene nuestro entorno cuando es iluminado con luz natural. No debemos olvidar que el color de los objetos depende de ellos mismos, pero también del *iluminante* que utilizemos para observarlos, los cuales pueden hacer que los veamos con diferente color. Este aspecto puede tener relativamente poca importancia en la iluminación de carreteras y calles, pero la cobra y de gran manera en nuestra casa o en determinados trabajos.

Como hemos podido observar, son muchos los aspectos a considerar si queremos llegar a tener una buena iluminación, es decir, una iluminación adecuada. Ello nos obliga a un análisis de cada situación, sin que ello implique tener mucha más de la que se requiere para la tarea a realizar. En tal caso, también puede ser perjudicial y, sobre todo, estaremos desperdiciando energía luminosa, aspecto especialmente comprometido tanto desde un punto de vista económico como medioambiental, además de contribuir a la contaminación lumínica, que cada vez más se está convirtiendo en un grave problema.

LOS INCONVENIENTES DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

Cada vez que realizamos una determinada actividad puede ocurrir que esta interfiera o perturbe las necesidades de otras. Esto queda patente en el caso del sonido y/o ruido que generamos, o en el de la iluminación que utilizamos; en tales situaciones solemos hablar de *contaminación acústica* y *lumínica*, respectivamente.

En el caso de la contaminación lumínica solemos pensar que el único problema que se genera es que iluminamos el cielo, impidiéndonos su observación. Aunque esto es totalmente cierto y grave, no es el único inconveniente, por lo que debemos tomar conciencia de lo que supone, como un primer paso para que todos contribuyamos a solucionarlo. En este sentido, la causa fundamental suele ser la iluminación de exteriores, ya que la de interiores es prácticamente despreciable.

La contaminación lumínica podría definirse como la iluminación del fondo del cielo nocturno debida a una mala iluminación



exterior de nuestras ciudades y carreteras. Esa mala iluminación es consecuencia, fundamentalmente, de dos grandes cuestiones: el mal diseño de las lámparas utilizadas, que envían parte de la luz hacia el cielo en vez de a la zona que debe ser iluminada, y el excesivo flujo luminoso utilizado. El primero de los factores puede ser tratado fácilmente, y ya son muchos los ayuntamientos que empiezan a tomar medidas en ese sentido, ya que se trata de conseguir una mejor disposición de las luminarias y que estas tengan un diseño más adecuado. El objetivo, por tanto, no es eliminar la iluminación sino hacerla más racional y efectiva.

Una vez aplicadas medidas en el diseño de las luminarias podrá reducirse el flujo luminoso emitido, ya que no se necesitará tanto, lo que supondrá una menor contaminación lumínica y un ahorro energético muy significativo.

Con objeto de que tomemos conciencia del problema, mencionemos algunos de los efectos que supone la contaminación lumínica:

- Perjudica gravemente la calidad del cielo nocturno, haciendo que sea muy difícil distinguir las estrellas. Un reciente trabajo realizado por científicos italianos indica que «alrededor del 83% de la población mundial y más del 99% de las poblaciones de Estados Unidos y Europa viven bajo cielos contaminados lumínicamente» y que «debido a la contaminación lumínica, la Vía Láctea no es visible para más de la tercera parte de la humanidad, incluido el 60% de los europeos y casi el 80% de los norteamericanos».
- Tiene un gran impacto sobre el ecosistema, ya que provoca migraciones de animales y alteraciones en las horas que usan para dormir. Los animales cambian sus hábitos de caza y se desorientan debido a que se dirigen a puntos luminosos, etc.
- Empiezan a mostrarse efectos psicológicos en el ser humano, a consecuencia de un descanso inadecuado.

El problema de la contaminación lumínica, así como sus posibles soluciones, son objeto de debates crecientes. Una vía prometedora para mitigar esa contaminación está en diseñar farolas cuya luz se difunda mucho menos que las tradicionales hacia arriba, concentrándola hacia abajo mucho más de lo que hacen las farolas tradicionales. Ello podría suponer además un ahorro de electricidad. Al evitar en las ciudades desperdiciar luz hacia arriba, donde ni peatones ni conductores de vehículos la necesitan para circular, se podría disfrutar del mismo nivel de alumbrado a poca altura que ahora pero a un menor costo económico.

¿Qué hace la luz?

Los fenómenos luminosos en la naturaleza son muy variados y de gran belleza. Se asocian con palabras como reflexión, refracción o dispersión, entre otras. Su descripción y explicación es fascinante y abre un abanico muy extenso de aplicaciones técnicas.

Anteriormente abordamos la descripción sencilla de la naturaleza de la luz, indicando apenas algo sobre su comportamiento. Hemos afirmado, por ejemplo, que viaja a velocidades muy elevadas y que sus trayectorias en el aire o en un vidrio son rectas. Nos planteamos ahora estudiar algunas facetas más sobre su conducta cuando se propaga, en especial cuando encuentra en su camino materiales diversos, como un espejo, un cristal, un medio turbio o, simplemente, un obstáculo. Esto nos va a llevar a estudiar una gran variedad de fenómenos, que llamaremos *reflexión, refracción, dispersión cromática, birrefringencia o doble refracción, esparcimiento, absorción y difracción*.

La luz se propaga en el vacío a una velocidad constante c que tiene un valor (según las mediciones más recientes) de $299\,793,0 \pm 0,3$ km/s. La velocidad en los medios materiales, v , varía con la constitución de estos, y cada medio viene caracterizado, desde este punto de vista óptico, por un escalar n llamado *índice de refracción* que se define como:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Es, por tanto, una comparación de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad en el medio material del que se trate.

Este parámetro nos permite caracterizar los distintos medios materiales. Así, cuando la velocidad de la luz en uno de ellos es igual en todos los puntos y en todas las direcciones, llamamos a este medio *homogéneo* e *isótropo*, siendo su índice de refracción constante; si varía con la dirección de propagación de la luz se denomina *anisótropo*, y si la velocidad, y por tanto el índice, varía de unos puntos a otros, pero en cada uno de ellos es independiente de la dirección, el medio se llama *heterogéneo*.

Como ejemplos de medios homogéneos tenemos a los vidrios ópticos y muchos plásticos. Un valor típico de índice de refracción para un vidrio puede ser 1,50 (el del agua es 1,33). Son anisótropos los cristales de sustancias que no cristalizan en el sistema regular, y la atmósfera en su conjunto es un medio heterogéneo, si bien en un recinto de dimensiones reducidas podemos considerarla homogénea.

Caracterizados así, podemos hacernos una pregunta: ¿qué camino o trayectoria sigue la luz para ir desde un punto a otro de un medio material? La respuesta nos la proporciona el *principio de Fermat*: la trayectoria dependerá del medio en el que se propague la luz; si es homogéneo e isótropo, esa trayectoria será una recta, pero si el medio no es homogéneo puede ser curva.

Esto no debe sorprendernos. Supongamos que hacemos rodar una pelota por un campo de césped perfecto. Lo hará probablemente en línea recta. Pero si el campo tiene faltas de homogeneidad en el césped o de uniformidad en la superficie, la pelota se desviará de la recta.

Dado que en distancias pequeñas podemos considerar homogénea la atmósfera, estamos acostumbrados a pensar que la luz se mueve en línea recta. Sin embargo, existen claros ejemplos que muestran trayectorias curvas de la luz en ella, como en el caso de los espejismos o de la observación aparente de las estrellas.

Nosotros, mientras no se diga lo contrario, supondremos que nos encontramos en medios homogéneos e isótropos, por lo

que podemos decir que la luz viaja en línea recta entre dos puntos de ese medio.

Nos preguntamos ahora: ¿qué ocurre cuando la luz llega a la superficie de separación de dos medios? En general, se producirán dos fenómenos: reflexión y refracción, es decir, parte de la luz volverá al medio inicial y parte se transmitirá al segundo medio.

LA REFLEXIÓN DE LA LUZ

La luz en su propagación puede encontrarse con un objeto y, en vez de penetrar en él y atravesarlo, volver hacia atrás, hacia el medio del que venía. Decimos entonces que la luz se ha reflejado, y al fenómeno lo llamamos *reflexión*. Ello es análogo a cuando lanzamos una pelota hacia una pared y regresa hacia nosotros tras chocar con ella. La pared refleja la pelota.

Este fenómeno luminoso está presente continuamente en nuestras vidas. Cuando la luz emitida por una lámpara llega a un objeto de una habitación, por ejemplo un libro, este la refleja en parte, de manera que llega hasta nuestros ojos. A nosotros nos parece que la luz procede del objeto, y así es, pero previamente este ha reflejado la que le llegaba de la lámpara que lo iluminaba.

La reflexión de la luz en un espejo es distinta. Cuando nos miramos en él, enviamos hacia el espejo (figura 1) la luz que nosotros hemos reflejado previamente de la lámpara que nos iluminaba, y este la refleja de nuevo hacia nuestros ojos. En este caso no vemos el espejo, sino nuestra cara. La reflexión que hace el espejo es distinta de la que hace la luz al reflejarse en nuestra piel. A la primera la llamamos *reflexión especular*, y a la segunda, *reflexión difusa*, y las caracterizaremos por separado. Baste de momento indicar que cuando la luz se refleja en nuestra piel (reflexión difusa), esta nos parece venir del propio objeto y por ello lo vemos. En el caso de la reflexión especular, el objeto que refleja, el espejo, en realidad no lo observamos. Solo sabemos que está ahí porque vemos sus bordes.

La reflexión de carácter especular

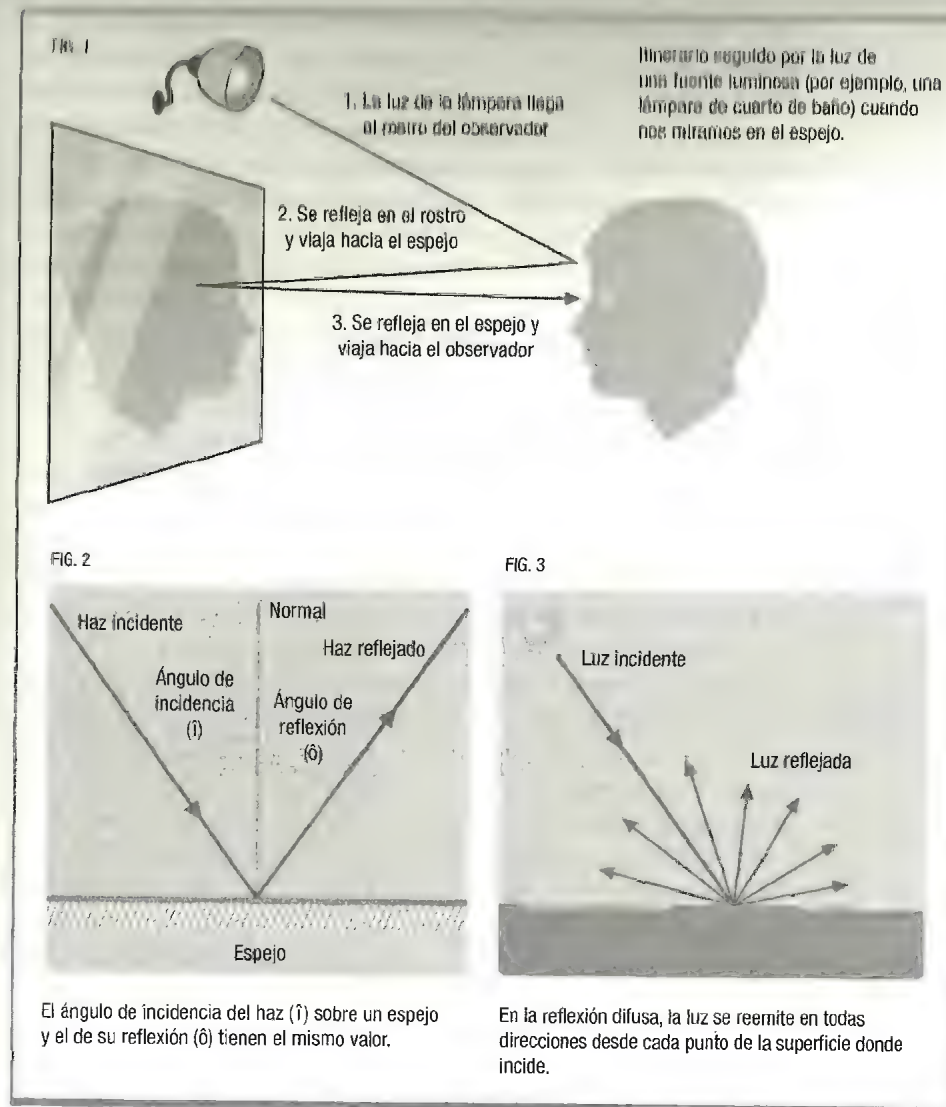
Este tipo de reflexión es el que se da en las superficies metálicas pulidas, o espejos. En ella, la luz que incide sobre el espejo se refleja en una sola dirección, como se indica en la figura 2, lo que permite formar imágenes, algo que conocemos bien, por nuestra experiencia cotidiana de mirarnos en el espejo. La imagen que este proyecta de nosotros mismos, además, se halla situada «detrás del espejo».

Existe una ley muy sencilla, conocida desde la Grecia clásica, que relaciona, en el espejo, el haz incidente, el reflejado y la *normal* (la perpendicular a la superficie del espejo). Esta ley nos dice que la dirección del haz incidente, la del reflejado y la *normal* están en el mismo plano, y que el ángulo de incidencia (i en la figura 2) y el de reflexión (o en esa figura) tienen el mismo valor.

La reflexión especular no se observa solo en los espejos, sino también en muchas superficies pulidas, como puede ser un vidrio de ventana. Si de noche nos acercamos a una de ellas en una habitación iluminada nos podremos observar reflejados en el vidrio. También hallamos reflexión especular en los «brillos» que se observan en suelos, coches o muchos otros objetos. Los brillos o reflejos tienen el color de la fuente que provoca la reflexión especular, como ocurre con los reflejos del Sol o la Luna en el mar.

Reflexión difusa, cuestión de dirección

En este tipo de reflexión no se sigue una ley matemática determinada. Se caracteriza por el hecho de que la luz reflejada lo hace en todas direcciones (figura 3). La presentan las superficies rugosas, como son la mayoría de los objetos opacos que nos rodean. Cada punto de la superficie del objeto reemite la luz en todas direcciones, por lo que se comporta como lo hace un punto emisor de una fuente luminosa, tal como vimos en el capítulo anterior. Por ello, al observar estos objetos tenemos la percepción de que la luz es emitida por ellos y los observamos como tales.



A veces la luz penetra algo en un objeto opaco y sufre reflexiones y refracciones en los pigmentos que puede contener (por ejemplo, una pintura), volviendo a salir después hacia el medio del que venía. Este comportamiento genera también luz

reflejada difusamente que se une a la reflejada por las rugosidades de la superficie. A menudo se dan simultáneamente en un objeto reflexión especular y difusa, con lo que tenemos una

mezcla de ambas. Este fenómeno podemos observarlo en la superficie de la mesa sobre la que, tal vez, estamos leyendo. Si nos movemos observaremos reflexión difusa en las direcciones en las que vemos la mesa de su

color, y reflexión especular en aquellas, muy determinadas, en las que no lo vemos, excepto el blanquecino de la luz que ilumina la habitación.

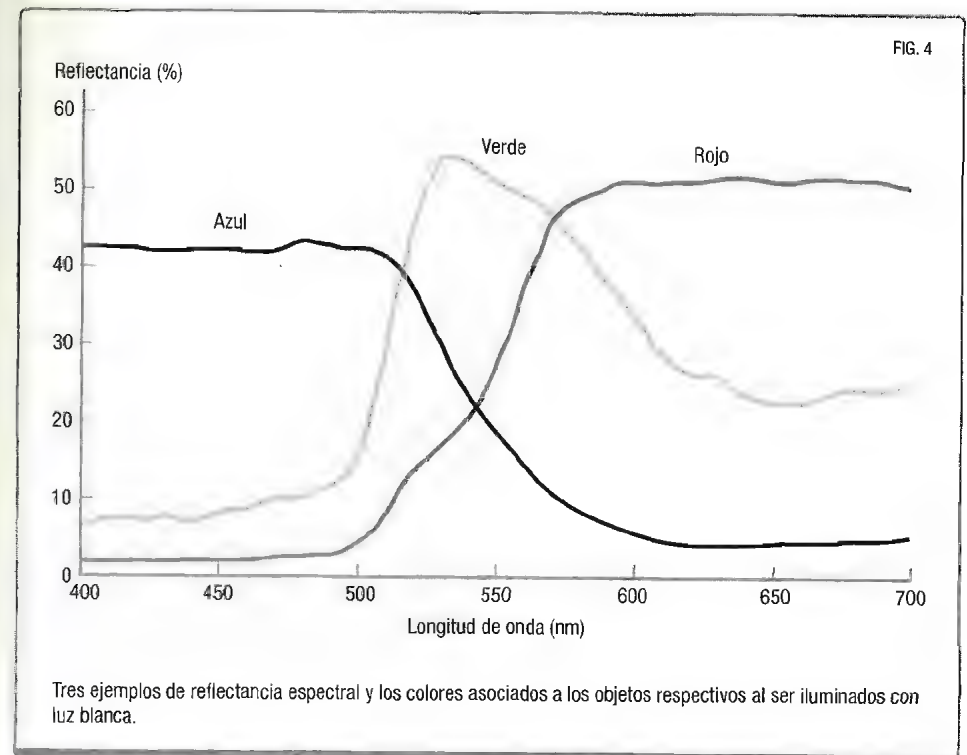
Lo anterior permite diferenciar la reflexión especular y la reflexión difusa en cuanto a la dirección en la que se refleja la luz, pero en ningún caso implica que una refleje más que la otra. Así, si nos preguntáramos quién refleja más luz, un folio blanco o un espejo, la respuesta sería que aproximadamente igual, alrededor del 98% de la que les llega, si bien en un caso la luz reflejada estará dirigida en una dirección y en el otro, en todas.

La luz reflejada por una superficie está parcialmente polarizada, alcanzando una polarización total para un determinado ángulo, lo que puede ser tenido en cuenta si esa luz reflejada es molesta. Así por ejemplo, en la nieve o en la playa hay mucha luz reflejada y muchas veces es sumamente molesta, por lo que resulta adecuado poder eliminarla. Un esquiador que realiza un descenso debe ver bien la pista, pero si hay un reflejo es probable que no lo logre, provocando quizá ello un accidente, de ahí que sea recomendable la utilización de gafas de sol polarizadas que eliminen la luz reflejada y permitan ver mejor lo que tenemos delante.

En la explicación anterior no hemos dicho nada sobre la longitud de onda de la luz que incide sobre la superficie. ¿Qué ocurre si la que llega es luz blanca? ¿Se reflejan igual todas las longitudes de onda o, por el contrario, lo hacen unas más que otras? La respuesta a esta última pregunta es que, dependiendo del material del que se trate, este reflejará más unas longitudes de onda que otras, haciendo que lo veamos de un determinado color.

El color que se atribuye a los materiales opacos que nos rodean se asocia normalmente con las características de la reflexión difusa que se produce cuando son iluminados. Se define la *reflectancia espectral* como el cociente del flujo radiante total emergente y el flujo radiante incidente sobre el objeto para cada longitud de onda.

En la figura 4 se muestran algunos ejemplos de reflectancia espectral y los colores asociados a los objetos respectivos al ser iluminados con luz blanca. A menudo oímos decir, o decimos, que un objeto es rojo porque refleja el color rojo y que otro es verde porque refleja el verde, pero, como podemos observar en dicha figura, las tres superficies representadas (azul, verde y roja) reflejan luz en todo el espectro visible, si bien es cierto que lo hacen en distinta proporción, es decir, un cuerpo es rojo porque funda-



mentalmente refleja las longitudes de onda largas, y muy poco las demás. Podríamos hacer planteamientos similares en el caso de un cuerpo verde o azul.

REFRACCIÓN: CUANDO LAS SUPERFICIES TRANSMITEN LA LUZ

Si la luz atraviesa vidrios o plásticos pulidos decimos que sufre refracción. Este fenómeno se refiere, por tanto, a la transmisión de luz a través de superficies, o sea, al paso de la luz de un medio a otro.

La refracción de la luz también se da en el agua, el alcohol, muchas disoluciones, etc., es decir, en medios que llamamos *transparentes*. Frente a los transparentes, que dejan pasar la luz, tenemos los *opacos*, que no lo permiten, sino que absorben la que no reflejan.

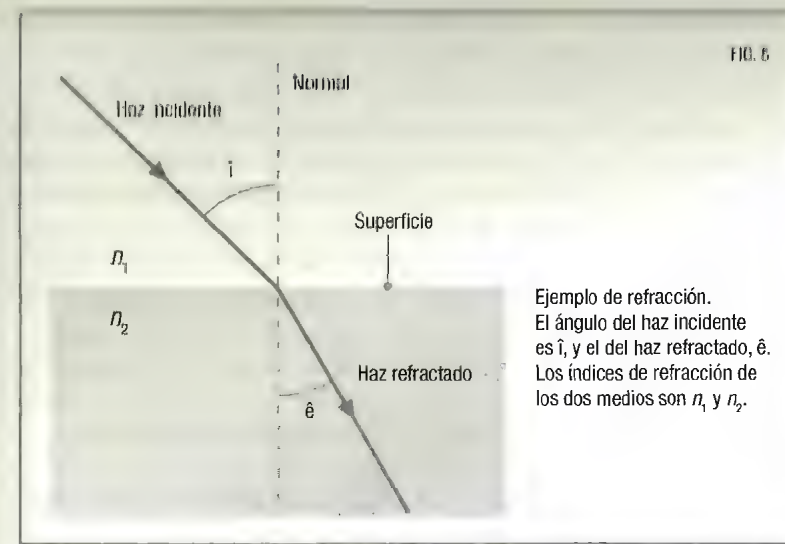
La refracción sigue también leyes sencillas. En este caso se habla de haz incidente y de haz refractado. Las direcciones de ambos y la normal a la superficie de separación de los dos medios están en el mismo plano y los ángulos de incidencia (\hat{i}) y de refracción (\hat{e}) cumplen la siguiente relación matemática:

$$n_1 \sin \hat{i} = n_2 \sin \hat{e},$$

donde n_1 y n_2 son los *índices de refracción* de los dos medios (figura 5).

La refracción de la luz es el fenómeno que rige el paso de esta a través de lentes para formar imágenes.

A veces, debido a que la superficie de separación de dos medios es rugosa o a irregularidades dentro del material por el que se transmite la luz, su paso no sigue las leyes de la refracción, sino que se transmite en todas direcciones. Podríamos pensar que, por analogía a la reflexión difusa, deberíamos llamar a este fenómeno «refracción difusa». Pero no es así, ya que solo se suele hablar de «difusión» de la luz, denominándose *translúcidos* a los materiales que la presentan. Se describe de esta forma a los vidrios esmerilados que a menudo se colocan en mampa-



Ejemplo de refracción. El ángulo del haz incidente es \hat{i} , y el del haz refractado, \hat{e} . Los índices de refracción de los dos medios son n_1 y n_2 .

ras de baño y en algunas ventanas. Se emplean cuando no se quiere que se vea lo que hay detrás pero sí que pase luz a través de ellos.

Decíamos antes que la reflexión y la refracción aparecen, en general, juntas, es decir, que parte de la luz se refleja y parte se refracta, pero ¿qué parte?, ¿de qué depende que se refleje más o menos y el resto se refracte? La respuesta está, fundamentalmente, en las características de los dos medios que separan la superficie, es decir, en el índice de refracción de ambos. Cuando estos tienen índices de refracción muy parecidos, casi toda la luz se transmite y muy poca se refleja, ocurriendo lo contrario si tienen índices muy diferentes.

Para que podamos ver una determinada superficie, esta debe reflejar algo de luz, que debe llegar a nuestro ojo; así, teniendo en cuenta lo mencionado, es posible entender que un objeto transparente y perfectamente visible cuando se encuentra en el aire sea totalmente invisible cuando se halle en otro medio.

Si en vez de hablar de la luz lo estuviéramos haciendo del sonido, tendríamos que decir cosas muy similares, ya que cuando dos medios son, desde el punto de vista acústico, muy diferentes, se

refleja casi toda la onda sonora, transmitiéndose muy poco, y al contrario si son muy parecidos.

Si hemos practicado alguna vez submarinismo habremos notado que bajo el agua casi no se oye nada del exterior. La razón está en que, desde el punto de vista acústico, el aire y el agua son medios muy diferentes, por lo que si una onda sonora incide en la superficie de separación de ambos casi toda la onda se refleja y se transmite muy poco sonido. De este modo, la onda sonora que le llega a una persona que está sumergida en el agua tiene poca intensidad.

DISPERSIÓN CROMÁTICA, EL SECRETO TRAS EL ARCOÍRIS

Una característica muy importante de la luz es que, salvo en el vacío, su velocidad depende de la longitud de onda. Hemos visto en el primer capítulo que la luz visible es una radiación electromagnética que puede tener longitudes de onda situadas entre los 400 y los 700 nm. En el vacío las luces de cualquier longitud de onda viajan a la misma velocidad, aproximadamente 300 000 km/s. En medios gaseosos como el aire pasa aproximadamente lo mismo que en el vacío, pero en la gran mayoría de los medios materiales dicha velocidad cambia significativamente en función de la longitud de onda, siendo normalmente superior para las mayores. Suele ocurrir, por tanto, que la luz de 650 nm viaja a mayor velocidad que la de 500 nm, siendo, en cualquier caso, velocidades muy elevadas.

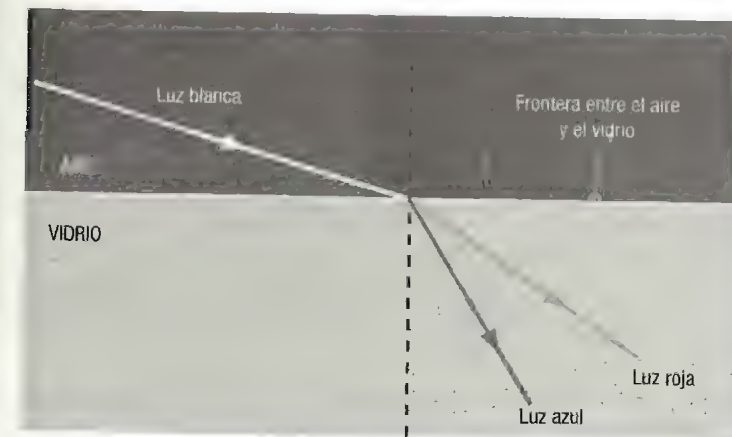
Con estos conocimientos podemos deducir que el índice de refracción también variará con la longitud de onda. Siguiendo con nuestro razonamiento, este índice será entonces menor para las longitudes de onda mayores.

Imaginemos ahora un experimento de refracción como el de la figura 6. Hacemos incidir luz blanca (compuesta, por tanto, por luces de longitudes de onda situadas aproximadamente entre los 400 y los 700 nm) en la superficie de separación existente entre el aire y un vidrio. Si aplicamos la ley de la refracción $n_1 \sin \hat{i} = n_2 \sin \hat{e}$, obtendremos que en la izquierda de la ecuación

siempre tendremos la misma cantidad: el índice de refracción del aire es prácticamente 1 para todas las longitudes de onda, y el ángulo de incidencia es común para todas. Si se ha de cumplir la igualdad, en la parte de la derecha, si n_2 cambia con la longitud de onda deberá cambiar también $\sin \hat{e}$. Si el índice de refracción es mayor para las longitudes de onda menores (azules) el ángulo de refracción tendrá que hacerse menor (figura 6). La consecuencia de este fenómeno es lo que se llama *dispersión cromática*. Al tener cada longitud de onda un ángulo de refracción, diremos que la luz se «abre» en sus componentes, o en otras palabras, que hemos conseguido separar las luces individuales que componían la luz blanca.

Este fenómeno es el mismo que provoca la formación del arcoíris, en el que la luz solar se descompone en sus luces fundamentales dentro de las gotas de agua que quedan en la atmósfera tras la lluvia. Descomponer la luz de esta forma supone, por tanto, conseguir su espectro, aspecto este que es fundamental en

FIG. 6



Ejemplo de dispersión cromática. Cada longitud de onda (color) tiene un ángulo de refracción distinto. Debido a ello, el haz incidente del ejemplo se bifurca en haces de colores diferentes, de los cuales destacamos uno azul y otro rojo.

LOS EXPERIMENTOS CON PRISMAS DE NEWTON

Uno de los experimentos más importantes de la historia de la óptica que realizó el físico británico Isaac Newton fue la Habi, en la que pasó la luz blanca por un prisma que demostró que la luz blanca está compuesta por otros colores elementales que, puestos en combinación, para obtener de nuevo luz blanca. En su caso, color, y el que se obtiene una combinación de colores tal que resulta la luz blanca que se trata por la ventana. Pero, ¿cómo se puede obtener la luz blanca a partir del prisma? Debía de ser blanca y no descomponerse en los colores elementales, como el rojo, el verde, el azul, el violeta, mostrando lo que observamos como colores elementales, en términos actuales, el espectro de la luz solar. Hay que apuntar que bastantes años después, cuando se suponía que era el propio prisma el que «coloreaba la luz».

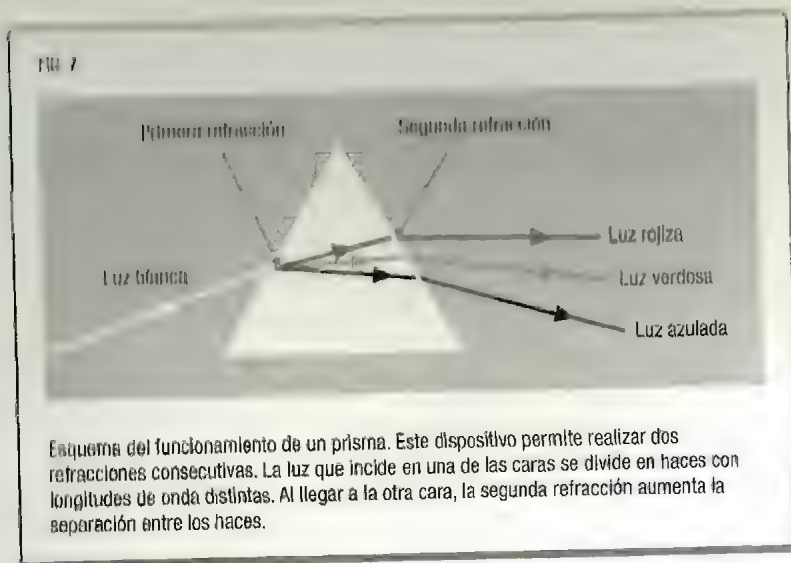
Del blanco a los colores, y viceversa

Para ello, colocó un diafragma sobre el espectro obtenido, aisló cada una de las luces elementales observables. En la segunda parte del experimento, realizada cuando, tiempo des-

pués, colocó un prisma, Newton volvió a obtener para que se obtenga luz blanca del espectro obtenido por el prisma. Es decir, hizo pasar la luz roja por el segundo prisma, sin obtener una nueva descomposición de luz. Con ello demostró que los prismas no coloreaban la luz, sino que lo que hacían era descomponer la luz blanca en otras luces elementales no determinados colores. Además, abrió la posibilidad de obtener luz blanca superponiendo luces de esos distintos colores, como puede conseguirse si a la salida del primer prisma colocamos una lente convergente y observamos qué ocurre en su plano focal. Hoy sabemos que también se puede obtener luz blanca sumando dos o tres luces elementales en adecuadas proporciones, como azul y amarillo, o rojo más verde más azul. Newton observó asimismo el distinto valor de la refracción para los distintos colores. La luz azul se refractaba más que la roja al pasar por el prisma, o sea, que se desviaba más de la trayectoria que llevaba antes de pasar por él.



Recreación artística de Isaac Newton llevando a cabo su crucial experimento, en un dormitorio de su casa.



todas las técnicas experimentales que comienzan con este término, como espectrofotometría, espectroscopia, etc.

Un método mejorado para conseguir espectros es realizar dos refracciones consecutivas, lo cual se realiza con lo que llamamos *prisma*. Este elemento óptico suele estar hecho de un vidrio que ha sido pulido de forma que tenga caras planas formando entre ellas un determinado ángulo. De esta manera, la luz que incide en una de las caras (figura 7) se descompone en sus componentes según las diferentes longitudes de onda debido al fenómeno de la dispersión cromática. Lo interesante es que al llegar a la segunda cara la luz vuelve a refractarse, aumentando la separación entre las luces de distinta longitud de onda.

LA BIRREFRINGENCIA O DOBLE REFRACCIÓN

En la vida cotidiana llamamos cristales a los vidrios que se colocan en las ventanas. Pero se trata de vidrios amorfos y no cristales, ya que las moléculas que los forman no disponen sus átomos en estructuras regulares como hacen los cristales verdaderos.

Pues bien, los cristales, salvo los del sistema cúbico, es decir, aquellos cuyos átomos, normalmente, ocupan los vértices de un cubo, presentan la propiedad conocida como doble refracción o birrefringencia.

En este fenómeno, la luz, al pasar del aire al cristal, sufre dos refracciones en la misma superficie, de forma que se propagan dos luces por el cristal. Este fenómeno puede observarse, por ejemplo, situando un cristal de espato de Islandia (una variedad de calcita transparente) sobre un papel escrito: a través de él veremos las letras dobles.

Las dos luces refractadas tienen un comportamiento distinto. Una de ellas sigue la ley de la refracción y se la llama *onda ordinaria*; la otra se denomina *onda extraordinaria*. Lo más curioso es que, además, ambas están polarizadas linealmente, en direcciones perpendiculares entre sí, de tal forma que si las observamos colocando un polarizador entre el cristal y nosotros y vamos girando este, habrá un instante en el que veremos una con la máxima intensidad, mientras que la otra no se verá, sucediendo lo contrario con una orientación perpendicular a la anterior.

ESPARCIMIENTO: ¿POR QUÉ EL CIELO ES AZUL?

El esparcimiento es un término que se refiere a un fenómeno luminoso que a veces se denomina difusión o dispersión de la luz. Entendemos, sin embargo, que el término más correcto para referirnos a él en castellano es «esparcimiento». De hecho, los otros dos, difusión y dispersión, los hemos asociado ya a otros fenómenos.

La luz, como onda electromagnética, puede interactuar con las cargas eléctricas que encuentra en su camino. Así, al propagarse, por ejemplo en la atmósfera, puede ser absorbida por los distintos tipos de moléculas del aire y estas reemitir la radiación. Al fenómeno por el cual la luz, que viaja en una determinada dirección, interactúa con partículas, que pueden ser átomos, moléculas o partículas más grandes, como gotas de agua o polvo, haciendo que estas la reemitan en todas direcciones, inclui-

Si busco la luz voy directamente a su fuente, no a ninguno de sus reflejos.

PEACE PILGRIM, ACTIVISTA ESTADOUNIDENSE

transmisión difusa, estos fenómenos se caracterizan también por el hecho de que la luz que sigue una dirección se convierte en luz dirigida en muchas direcciones.

El fenómeno del esparcimiento de la luz es apreciable con solo observar la atmósfera, la luz a través de la niebla, o el paso de la misma a través de un medio turbio. El color azul del cielo es consecuencia del esparcimiento de la luz por las moléculas del aire (oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono, principalmente). De igual manera sucede con los tonos amarillos, anaranjados y rojizos cerca del Sol al atardecer, y la luz que nos llega de él en un día nublado corresponde a la luz solar esparcida por las nubes.

La diferencia entre la situación de la luz esparcida por átomos y moléculas y la esparcida por partículas más grandes es que en el primer caso existe una dependencia de la longitud de onda, y en el segundo, no. Así, el color azul del cielo es consecuencia de que la luz que viene del Sol se esparce más si es de menor longitud de onda (azul). Al amanecer o al atardecer, la luz que viene directa del Sol atraviesa mucha atmósfera, al estar este más bajo, acentuándose entonces el esparcimiento de la luz de longitud de onda corta, por lo que la luz directa del Sol pierde contenido en azul y el cielo se verá anaranjado o rojizo. Si miramos hacia arriba, al cenit, lo seguiremos viendo azul.

La luz esparcida está parcialmente polarizada, alcanzando la máxima polarización en la dirección perpendicular a la incidente. De este modo, si miramos al cenit, estando el Sol a nuestra izquierda o derecha, la luz que fundamentalmente nos llega es esparcida y polarizada, por lo que si lo observamos a través de un polarizador y vamos girándolo, veremos que hay una posición en la que se oscurece. Esta polarización parcial de la luz esparcida en la atmósfera es aprovechada por muchos insectos, como las abejas, para orientarse.

da la del sentido opuesto a la original, se le llama *esparcimiento de la luz*. Volviendo a la terminología, que se le llame difusión de luz tampoco es del todo desacertado, pues como hemos visto en los casos de reflexión o de

En el caso de las nubes, las vemos blancas o grises, dado que las gotas de agua de las nubes esparcen la luz por igual según las longitudes de onda, luego no es un fenómeno en el que se aprecien diferencias según los colores del espectro. En todo caso si se ven grises es porque las gotas también absorben luz. A este tipo de esparcimiento se le llama *esparcimiento* o *difusión de Mie*. Al anterior, para partículas pequeñas, lo llamamos *esparcimiento* o *difusión de Rayleigh*.

ABSORCIÓN Y LEY DE LAMBERT-BEER

A lo largo de esta exposición hemos indicado, de vez en cuando, que la luz era absorbida por un medio material. Pero los fenómenos de reflexión, refracción y difusión pueden ir también ligados a fenómenos de absorción de la luz, es decir, que simultáneamente a que se refleje, se refracte o se difunda, puede ser asimismo absorbida por el material. Pensemos en un trozo de cartulina verde. Además de reflejar difusamente la luz que le llega, también la absorbe. Si la percibimos como verde es porque está reflejando en mayor medida las longitudes de onda de tono verde del espectro. Pero ¿dónde van a parar las luces que no refleja? Pues, las absorbe el propio material. Por tanto, el proceso de absorción está ligado íntimamente al color que presente la cartulina. Si esta fuera gris, ello sería porque absorbería por igual las distintas longitudes de onda de la luz blanca. Y si reflejara toda la luz que le llegase, con independencia de la longitud de onda, la veríamos blanca, si estuviera iluminada con luz de ese color.

En la difusión de la luz ocurre algo parecido. Las nubes grises absorben y esparcen luz por igual en todas las longitudes de onda. Sin embargo, cuando la atmósfera está cargada de polvo nos da un color del cielo amarillo anaranjado, ya que estas partículas, además de difundir la luz, absorben principalmente luz azul y verde.

Si tenemos una disolución o un vidrio coloreados es porque dicha sustancia absorbe determinadas longitudes de onda en

mayor medida que otras. Un vidrio rojo absorbe principalmente luz azul, verde y amarilla y deja pasar, especialmente, luz roja. En el caso de medios transparentes, la cantidad de luz que sale del material, es decir, la no absorbida, depende, por tanto, de la longitud de onda, pero también de otras variables, como el espesor de material atravesado, y la concentración, si se trata de una disolución. A mayor espesor y mayor concentración, menos luz emerge. Se suele cumplir la denominada *ley de Lambert-Beer*, que nos indica que una magnitud, que llamaremos *absorbancia*, es proporcional a la longitud de material atravesado y a la concentración de la disolución. Matemáticamente:

$$A = kCd,$$

siendo A la absorbancia, C la concentración, d el espesor del material (de la cubeta si es una disolución) y k una constante. A y k dependerán normalmente de la longitud de onda de la luz que hagamos pasar por la disolución.

La absorbancia nos indica la capacidad del material para absorber luz y se define como:

$$A = \log(1/T),$$

es decir, como el logaritmo del inverso de la *transmitancia* (T). Esta última magnitud es el cociente entre la cantidad de luz transmitida y la cantidad de luz incidente. Otra forma de enunciar la ley de Lambert-Beer es decir que la intensidad de la luz que atraviesa el material decae de forma exponencial conforme esta avanza por él.

A la absorbancia, cuando se trata de vidrios plásticos o películas fotográficas, se la llama *densidad óptica*. Esta magnitud la podemos encontrar, por ejemplo, en las gafas que se usan para observar eclipses o en las gafas para soldadura.

Imaginemos ahora un sencillo experimento. Supongamos que tenemos tres globos inflados, uno blanco, otro verde y el tercero

rojo; tenemos también dos punteros láser, uno verde y otro rojo. ¿Podríamos hacerlos explotar al apuntármolos sobre ellos con uno de nuestros punteros? ¿Qué globos explotarían si utilizamos el puntero verde? ¿Y si utilizamos el puntero rojo? Si encendemos nuestro puntero y hacemos incidir la luz que emite sobre uno de los globos, al llegar a su superficie parte de la luz será reflejada y la otra parte será absorbida; por otro lado, recordemos lo que hemos dicho del color de los objetos: de acuerdo con ello, una superficie roja refleja más las longitudes de onda largas (rojos) que las más cortas; una verde refleja más los verdes y menos las otras; y en cambio, una blanca refleja por igual todas las longitudes de onda. Con todo lo dicho, en el experimento que acabamos de plantear debemos esperar que sea más fácil hacer explotar el globo verde con el puntero rojo y el globo rojo con el puntero verde, mientras que en el caso del globo blanco va a ser igual de difícil hacerlo explotar con un puntero que con el otro, ya que el blanco refleja todas las longitudes de onda.

DIFRACCIÓN, LA LUZ ANTE EL OBSTÁCULO

En ocasiones, cuando vemos pasar la luz entre las ramas y hojas de un árbol, observamos figuras luminosas un tanto extrañas, a modo de destellos. Si miramos la luz reflejada en un disco compacto (CD) vemos colores reflejados que cambian al moverlo. La luz de una farola, al contemplarla a través de un visillo, forma figuras con puntas, lo mismo que sucede si miramos una lámpara de incandescencia y entornamos los ojos hasta casi cerrarlos. Todos estos son fenómenos de difracción de la luz y suceden cuando esta encuentra en su propagación bordes, orificios u obstáculos pequeños: los bordes de las hojas del árbol, las pequeñas hendiduras hechas en el CD cuando se graba la música digitalmente, la trama de hilo del visillo o los bordes de nuestros párpados.

Los fenómenos de difracción son, por tanto, fáciles de observar en nuestra vida cotidiana y se caracterizan por esas figuras tan distintas de las sombras que podríamos esperar.

Los fenómenos de difracción, cuando se realizan con luz blanca, la descomponen en su espectro, como hemos dicho que sucede en el CD. Este hecho se aprovecha para obtener lo que se conoce como *redes de difracción*, que son elementos ópticos que consisten en multitud de rendijas grabadas sobre un vidrio o una superficie metálica. Por ejemplo, una red de difracción comercial puede tener 15 000 rendijas en 2,5 cm. Con las redes de difracción se consiguen espectros de gran calidad y resolución (separación de las longitudes de onda). Además, son más baratas de fabricar que los prismas y su manejo es menos delicado, por lo que los instrumentos en los que hace falta descomponer espectralmente la luz (espectrofotómetros, etc.) están equipados en la actualidad con redes de difracción en vez de prismas.

LAS INTERFERENCIAS TAMBIÉN PUEDEN SER ÚTILES

Una luz puede interferir con otra y dar lugar al fenómeno conocido como *interferencias*. En nuestra vida cotidiana hemos utilizado este término para referirnos al momento en que en la televisión se mezclan dos señales, dando un resultado que no se parece ni a lo que queremos ver ni a lo que interfiere con ello. También hablamos de interferencias cuando un sonido se mezcla con otro y el resultado es ruido. Estos fenómenos son puramente ondulatorios, y la luz, como onda electromagnética, también los presenta.

Sin embargo, en la naturaleza no se observan de manera tan frecuente como los de difracción. Las interferencias lumínicas son las responsables de la coloración que se advierte en la luz reflejada en una pompa de jabón o en una mancha de aceite en la carretera. En estos casos las interferencias se producen al superponerse distintas luces reflejadas en la película de jabón o de aceite. Los cambios de color obedecen a cambios en el ángulo de observación y a diferencias de espesor de la capa de estos materiales. Estas interferencias se generan artificialmente en los recubrimientos antirreflejantes con que se dotan a los vidrios de

las gafas y que se notan por el reflejo colorado. Otros casos de interferencias que podemos observar en la naturaleza los tenemos en la coloración de las alas de ciertos insectos o en otras partes de su cuerpo.

¿Qué podemos hacer con la luz?

Las tecnologías asociadas a la luz, denominadas ópticas o fotónicas, son muy abundantes y dan lugar a una gran cantidad de dispositivos e instrumentos muy cercanos a nosotros. De hecho, muchos de ellos forman parte de nuestra vida cotidiana y su uso y variedad no hacen más que aumentar en los últimos tiempos.

Hasta ahora hemos visto algunos aspectos de lo que la luz hace de forma «natural», así que es el momento de exponer algunas de las manipulaciones que es posible hacer con ella de forma «artificial». Por ejemplo, muy frecuentemente se dice que estamos en la era de las imágenes, que nuestro mundo se mueve alrededor de ellas y que son nuestra principal fuente de información. Pensemos solo en la televisión o en internet. Ahora bien, para tener una imagen es preciso disponer antes de un sistema que la genere, y en este, casi siempre, interviene la luz.

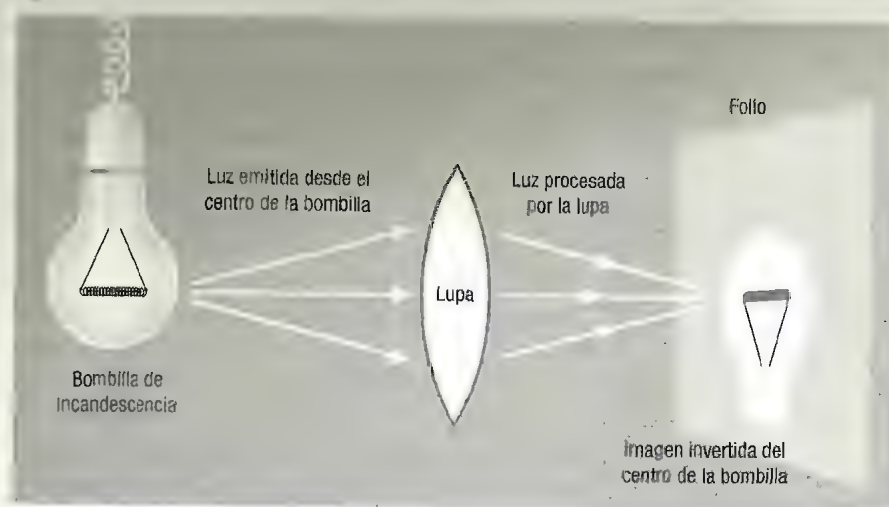
Para comprender lo que es la formación de una imagen proponemos un experimento sencillo. Cojamos una lupa, un folio blanco y un flexo dotado de una bombilla de incandescencia, de esas en las que se ve el filamento de tungsteno. Coloquemos la lupa frente a la bombilla, no demasiado cerca, y movamos el folio hasta que veamos cómo se concentra la luz y se forma en él una imagen invertida en la que se aprecia el filamento incandescente (figura 1). Efectivamente, llamamos «imagen» a algo que aparece en el folio y que tiene la misma apariencia que el filamento original, aunque no debe tener necesariamente el mismo tamaño. Estamos ante una representación del «objeto».

¿Qué ha ocurrido para que se forme la imagen? La luz ha conseguido representar punto a punto al objeto hasta conseguir sobre el folio un «dibujo» del mismo. En otras palabras, la luz que sale de cada punto del objeto y que pasa por la lupa se concentra en otro punto del folio, de manera que cada punto del objeto se representa en un punto de la imagen, como muestra la figura 1. Por tanto, conseguir imágenes consiste, en la práctica, en reproducir punto a punto un objeto mediante luz.

¿Qué hubiera ocurrido si en vez de una bombilla hubiéramos tenido otro tipo de objeto, como una persona o un edificio? ¿Qué sucede si, por ejemplo, colocamos la lupa frente a una ventana en un día luminoso? La respuesta es que sucederá lo mismo: el edificio (figura 2) recibirá la luz del Sol, esta sufrirá reflexión difusa en las paredes, y cada punto de la construcción actuará como emisor de luz. De nuevo, la lupa formará la imagen en el folio si se coloca a este en la posición adecuada, es decir, en el plano en el que se concentra la luz punto a punto. Si desplazamos el folio por delante o por detrás de esta posición, tendremos lo que se llama una «imagen desenfocada», consecuencia de que en ella la imagen de un punto no es aproximadamente tal sino un círculo de luz de un cierto tamaño, perdiéndose nitidez.

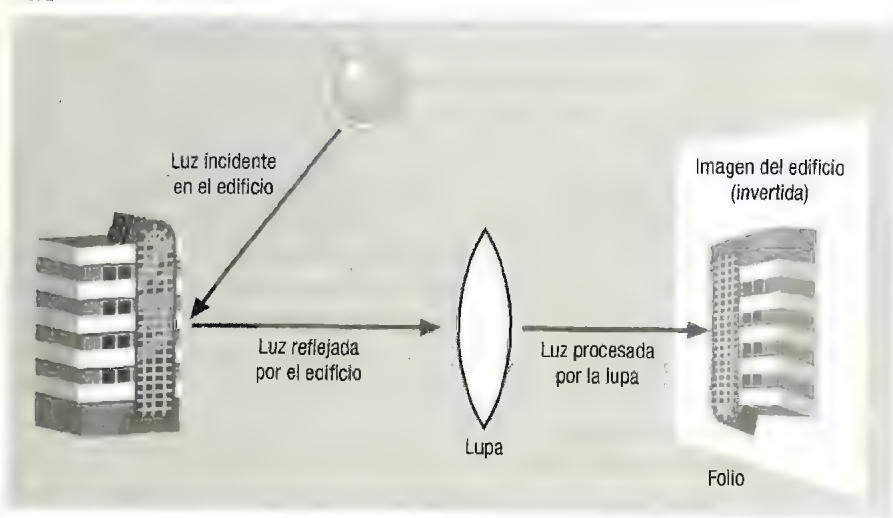
Este tipo de imagen, que se puede recoger sobre un folio, o sobre una pantalla, como la que se proyecta en un cine, la denominamos imagen *real*. Paralelamente, hay otra clase de imágenes, a las que estamos muy acostumbrados, que llamamos *virtuales*. Son las que observamos en un espejo plano o cuando acercamos una lupa a un objeto pequeño que queremos ver más grande. Las imágenes virtuales no se pueden recoger sobre una pantalla sino que «están detrás» del espejo o la lupa. En el caso de un espejo plano, como el que solemos tener en el cuarto de baño, al mirarnos nos veremos «detrás» de él, a una distancia aparente del espejo que es muy parecida a la que nos separa realmente de su superficie. En la figura 3 mostramos un esquema de lo que le pasa a la luz que viene de una persona cuando esta se refleja en un espejo (reflexión especular). En este caso, la luz que se refleja no converge después de reflejarse, sino que diverge, como si viniera de puntos situados detrás del espejo. Esto lo representa-

FIG. 1

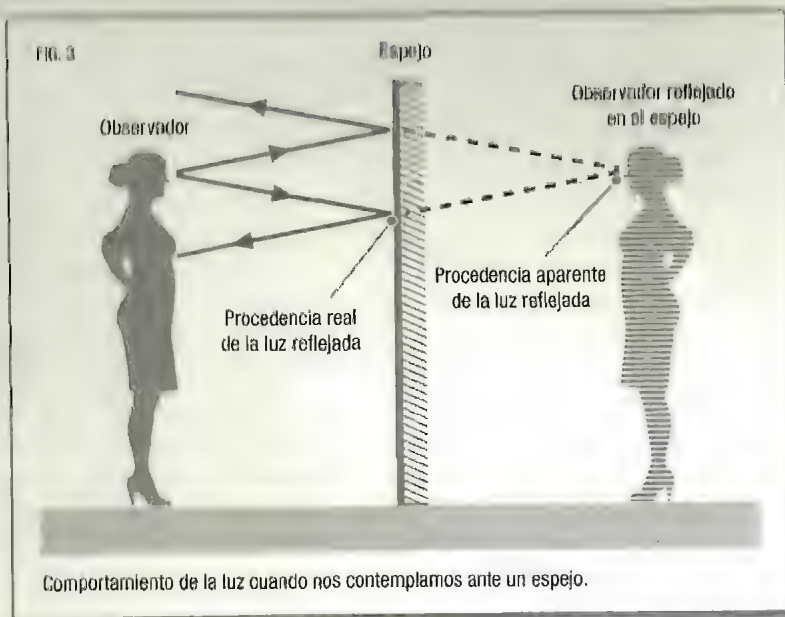


La luz procedente del filamento incandescente que se encuentra en el centro de la bombilla, tras pasar por la lupa, forma en la superficie del folio una imagen invertida.

FIG. 2



Tras pasar por la lupa, la luz procedente del edificio forma en la superficie del folio una imagen invertida de dicho edificio.



mos trazando con línea discontinua la prolongación de los rayos reflejados. Por tanto, cuando recibimos la luz que se refleja en el espejo es como si recibiéramos la de un objeto que estuviera detrás de dicho espejo. A esto se le llama imagen virtual. La imagen no invertida y más grande que se ve al observar objetos a través de una lupa también es virtual. El objeto aparece detrás de la lupa y más cerca.

A veces queremos formar imágenes de objetos que están muy lejos, en el infinito ópticamente hablando. Si quisiéramos usar una lupa para encender un cigarrillo, la colocaríamos frente al Sol y concentraríamos su luz en la punta del cigarrillo. Lo que haríamos con ello sería colocar allí la imagen real que la lupa proporcionaría del Sol. Otras veces estaremos interesados en obtener imágenes en el infinito. Esto puede parecer en principio sorprendente, pero sin embargo es muy común. Nuestro ojo se encuentra más cómodo cuando observa objetos muy lejanos. En muchos aspectos, es entonces cuando no se fuerza la vista, y esta situación de cierta relajación sucede cuando contemplamos

objetos a más de 6-8 metros de distancia. Los instrumentos ópticos en los que solemos colocar un ojo detrás, como es el caso de los microscopios y los telescopios, se diseñan de tal forma que la imagen que proporcionen se forme en el infinito, para que el ojo la observe como si fuera muy lejana y, por tanto, esté relajado.

Hemos puesto ejemplos de cómo podemos conseguir imágenes de un determinado objeto, utilizando para ello una lupa o un espejo. Este elemento que nos permite obtener una imagen es lo que llamamos, en general, *sistema óptico*. Un sistema óptico puede estar constituido por una sola superficie, como es el caso de un espejo, o por muchas superficies que separan medios de distinto índice de refracción, como puede ser el conjunto de lentes que constituye un determinado instrumento óptico.

Por otra parte, hemos visto que una imagen puede ser real o virtual. Que sea real no nos suele llamar la atención, pero si es virtual nos puede llegar a sorprender. Sin embargo, son muchas las ocasiones en las que trabajamos con, o simplemente observamos, imágenes virtuales. Por ejemplo, en alguna probablemente habremos observado una misma piscina, vacía en una ocasión y llena de agua en otra, y habremos notado que llena parece mucho menos profunda. ¿Por qué sucede esto? La superficie del agua es un sistema óptico, ya que separa dos medios, agua y aire, de índice distinto. Cuando miramos el fondo de una piscina llena de agua estamos viendo la imagen que ese sistema óptico nos da del fondo, una imagen virtual que está más cerca de la superficie de lo que estaba el objeto, el mencionado fondo de la piscina.

JUGANDO CON ESPEJOS

Los espejos son muy habituales en nuestro entorno: los usamos con objetivos muy variados y en múltiples situaciones, que van desde la más simple y cotidiana hasta su utilización en tecnologías sofisticadas y de vanguardia.

El espejo plano es el elemento óptico de uso más habitual entre nosotros, no en vano una de las primeras cosas que solemos hacer cada día es mirarnos en él. Se dice usualmente que la ima-

gen que nos proporciona es una imagen invertida de derecha a izquierda y no de abajo arriba. Esto suele provocar que nos cueste mucho efectuar ciertas tareas ante el espejo, y también explican por qué el rótulo de las ambulancias está escrito al revés, ya que lo que se pretende es que el conductor que va delante, mirando a través del espejo retrovisor de su coche, identifique claramente aquello que viene detrás, para así facilitarle el paso. Los magos usan mucho los espejos en sus trucos; por ello no suelen llevar en las manos nada que las identifique como izquierda o derecha (relojes, anillos u objetos similares).

Nuestra imagen, vista por nosotros en el espejo, suele parecerse distinta a la que tienen las personas que nos miran directamente. ¿Qué podríamos hacer para vernos tal como nos contemplan los demás? Lo podemos conseguir con dos espejos planos formando un ángulo de 90° . Esta distribución se puede encontrar en muchos probadores de tiendas de ropa. Si nos colocamos entre ellos observaremos tres imágenes de nosotros: las dos primeras serán las proporcionadas por cada uno de los espejos y, por tanto, serán imágenes que tienen esa inversión de derecha a izquierda; la tercera aparecerá en la dirección del vértice de unión de los espejos y será una imagen que no presentará inversión, ya que será aquella que un espejo nos dará de la que ha producido el otro. Si modificamos el ángulo que forman los dos espejos podremos observar una gran variedad de imágenes, método en el que se basa el *caleidoscopio*.

El caleidoscopio fue inventado por sir David Brewster, un científico escocés, en 1816, siendo patentado por él un año después. El nombre que le dio al invento proviene de las palabras griegas *kalos* (bonito), *eidos* (forma) y *scopos* (observador). Los elementos que conforman un caleidoscopio son básicamente tres espejos planos que se sitúan formando un triángulo equilátero, aunque es posible construir otras versiones. Si colocamos pequeñas cuentas de colores entre ellos, podremos observar las múltiples imágenes simétricas que lo han convertido en un instrumento muy popular entre la población.

Aunque el espejo plano es el más habitual, también usamos muy a menudo otros en los que su superficie no es un plano, sino

que consiste en una superficie esférica. Los llamamos espejos esféricos, de los que distinguimos dos tipos: *cóncavos* y *convexos*, según sea la geometría de la superficie espejada.

La imagen que proporcionan los espejos cóncavos de un objeto dado depende de la posición en la que se encuentre este. El mejor ejemplo de la utilización de este tipo de espejo lo podemos encontrar en aquellos que se suelen usar para maquillarnos, los llamados popularmente como «espejos de aumento». Para apreciar qué tipo de imagen generan, nada mejor que seamos nosotros el propio objeto y nos coloquemos delante de él. Cuando estemos muy próximos observaremos nuestra imagen más grande y correctamente orientada, de ahí que se les conozca como espejos de aumento; se trata de una imagen virtual, pues la observaremos como si estuviera detrás del espejo. Pero si nos vamos alejando progresiva y lentamente, habrá un momento en el que dejaremos de ver nuestra imagen: nos encontraremos en lo que se conoce como el *foco* del espejo y nuestra imagen estará en el infinito. Si siguiéramos alejándonos aparecería nuestra imagen como si «flotara» frente a nosotros, delante del espejo, siendo ahora una imagen real e invertida.

También son muy habituales la utilización de espejos convexos y la observación de las imágenes que producen. Los podemos ver en algunas esquinas de calles, en bastantes supermercados e incluso mirando simplemente a alguien a los ojos. Cuando hacemos esto último vemos en ellos nuestra imagen. Cuando la luz llega al ojo, parte se refleja y parte se transmite. En cuanto a la que se refleja, la cara anterior de la córnea de nuestro ojo está actuando como un espejo convexo y lo que observamos es la imagen que este da del objeto que esté observando.

Como podemos apreciar en los tres ejemplos indicados, la imagen de un espejo convexo es virtual, no invertida y de menor tamaño que el objeto, independientemente de la posición que tenga este.

Pueden construirse y usarse asimismo espejos en los que la superficie espejada no sea esférica; esta dependerá del uso que pretendamos conseguir con ellos. Se pueden usar *espejos parabólicos* para concentrar luz en el foco de la parábola, espejos

cilíndricos que se colocan envolviendo la tubería por la que circula el agua que pretendemos calentar, espejos con una superficie peculiar que se fabrican para que veamos nuestra imagen deformada (los llamados espejos de feria), etc. Estos y muchos otros ejemplos se agrupan en la categoría de espejos especiales.

LENTEs CONVERGENTES Y DIVERGENTES

El otro sistema óptico al que estamos muy habituados es la lente, y de hecho ya hemos puesto algunos ejemplos sobre ella. Podemos definir a una lente como un sistema óptico constituido por dos superficies que separan medios diferentes; dependiendo de las características de los medios y de las superficies, podremos tener distintos tipos de lentes. Las más habituales son las constituidas por superficies esféricas que separan el aire del vidrio óptico del que están hechas. Dentro de este tipo de lentes, podemos hablar de dos clases: *lentes convergentes* y *lentes divergentes*. A las primeras las llamamos así porque cuando llega hasta ellas un conjunto de rayos de luz, estos convergerán después de atravesarlas. Si por el contrario los rayos divergen tendremos una lente divergente.

Una forma de caracterizar una lente es considerar la distancia desde ella hasta el punto donde convergen los rayos, si estos vinieran del infinito. A esa distancia la llamamos *distancia focal*; si la expresamos en metros y calculamos su inversa, tendremos lo que se conoce como potencia de la lente, que se expresa en *dioptrías*. Así, si tuviéramos una lente con la que formáramos a 20 cm de ella la imagen de un objeto situado muy lejos, podríamos decir que disponemos de una lente de 5 dioptrías de potencia.

Las lentes convergentes tienen potencia positiva y las divergentes negativa. Si tomamos la lupa de nuestro ejemplo anterior, donde la usábamos para encender un cigarrillo, y medimos la distancia desde ella hasta el punto donde se concentran los rayos de luz, por ejemplo 10 cm, esto significará que su lente tiene una potencia de 10 dioptrías. Análogamente, cuando oímos que

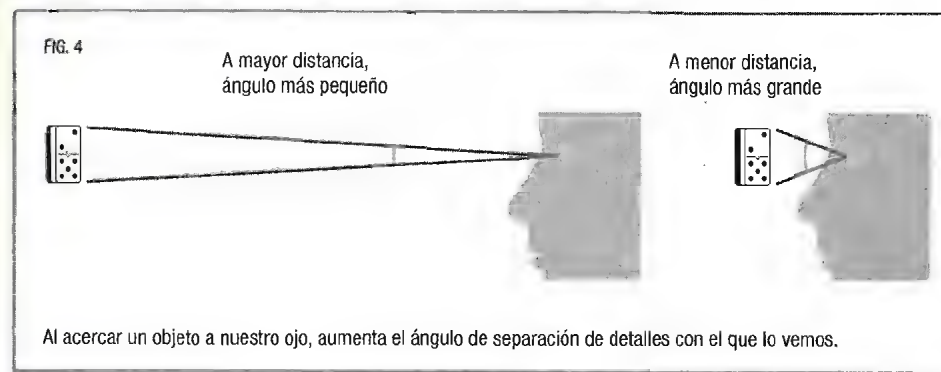
una cámara de fotos dispone de un objetivo de 50 mm, ello implica que su potencia es de 20 dioptrías.

La potencia de una lente depende de los índices de refracción de los medios que separa, de los radios de curvatura de sus superficies y de su espesor, por lo que si variamos alguno de estos parámetros dicha potencia cambiará. Así, una lente de una determinada potencia cuando se halla en un entorno de aire, tendrá otra diferente si la introducimos en agua.

MICROSCOPIOS, LO PEQUEÑO A NUESTRO ALCANCE

Cuando queremos ver detalles pequeños de un objeto, lo acercamos todo lo posible a nuestro ojo. Con ello aumentamos el ángulo con el que vemos el objeto y el ángulo de separación entre detalles (figura 4). Sin embargo, a menudo el detalle es tan pequeño que por mucho que lo acerquemos no podremos resolverlo: si aproximamos nuestra mano a la cara, podremos ver pequeñas arrugas en la piel, pero si queremos ver las células cutáneas a simple vista, ello será imposible, pues distinguirlas significaría separar unas de otras, ver sus paredes, núcleo y demás constituyentes. Necesitamos en este caso un instrumento que nos aumente aún más el ángulo que separa estos detalles.

Este instrumento es el *microscopio*, un dispositivo pensado para ayudar al ojo a ver lo que a simple vista no puede distinguir



de los objetos. Para conseguirlo, forma de estas una imagen en el infinito que el ojo aprecia con un ángulo mucho mayor que aquel con el que los vería por mucho que se acercara.

Vemos transcurrir el pasado en un telescopio, y el presente en un microscopio. De ahí provienen las aparentes inmensidades del presente.

VICTOR HUGO

to. Esto ocurre cuando, al mirar por el ocular, la imagen se ve nítida. Recordemos que el ojo observa imágenes nítidas en el infinito cuando está relajado. Por tanto, si tras levantar la vista y mirar al fondo del laboratorio, volvemos a mirar por el microscopio y observamos bien la imagen, ello implicará que el aparato está correctamente enfocado. En caso contrario significará que se necesita enfocar de nuevo.

Los microscopios ópticos tienen un límite de aumentos relacionado con la propia capacidad del sistema visual humano de ver detalles y con la longitud de onda de la luz. Por eso, cuando queremos ver objetos aún más pequeños recurrimos a otro tipo de microscopios, en especial al *microscopio electrónico*, en el que en vez de usar luz se emplean haces de electrones, a los que se les puede tratar como ondas de longitud de onda mucho más pequeña que la luz visible y que los rayos X.

TELESCOPIOS PARA VER MÁS ALLÁ DE DONDE ALCANZA LA VISTA

Si los microscopios se emplean para ver objetos pequeños y accesibles, los telescopios tienen la función de ayudar al ojo a ver objetos grandes pero lejanos. Debido a su lejanía, aunque los objetos sean muy grandes, como las estrellas, son vistos por nuestro ojo con un ángulo de visión muy pequeño, de hecho como puntos. Con los telescopios lo que aumentamos de nuevo

Para formar la imagen final en el infinito el microscopio dispone de dos conjuntos de lentes que llamamos *objetivo* y *ocular*, respectivamente. La distancia entre ellos es fija y lo que hacemos al enfocar es desplazar el tubo del microscopio con respecto a la platina hasta que el objeto situado en esta forme su imagen en el infinito.



Ácaro de la especie *Lorryia formosa* aumentado 850 veces mediante un microscopio electrónico de barrido. Habitante habitual de los cítricos, el ácaro amarillo, como se le conoce comúnmente, aparece en la imagen entre algunos hongos.

es el ángulo con el que vemos dichos objetos, formando imágenes de ellos que son vistas por el ojo con un ángulo mucho mayor. En este caso el objeto se halla muy lejos y la imagen ha de formarse también en el infinito, si pretendemos hacer observación visual.

Normalmente hablamos de telescopios refiriéndonos a los instrumentos empleados en observatorios astronómicos para la observación de estrellas, planetas, galaxias y otros astros del espacio exterior. Pero también son telescopios los usados para observación terrestre de objetos lejanos, como los prismáticos, anteojos, catalejos, etc. Cuando se emplean para la observación visual constan de dos partes que, como en los microscopios, se llaman objetivo y ocular. El primero es muy diferente del de los microscopios y suele estar formado o bien por lentes o bien por espejos de gran tamaño. Los que vemos en los observatorios astronómicos importantes suelen tener un gran espejo esférico. A menudo, al mencionar telescopios concretos de tales observatorios, se alude al diámetro de dicho espejo, y así por ejemplo se habla del telescopio de 3,5 m de Calar Alto (en Almería, España). Este dato es muy importante pues nos da idea de la cantidad de luz que puede captar el telescopio del objeto cósmico que se pretende observar. La luz que se emplea en un telescopio para formar la imagen del astro está en función del diámetro del objetivo. Que este sea grande es esencial cuando se trata de objetos cósmicos de los que nos llega una luz muy débil. Aparte de los telescopios para la banda del espectro electromagnético ocupada por la luz visible, hay otros instrumentos con los cuales es factible escrutar el cosmos en las demás bandas de dicho espectro. Gracias a ellos, se hacen observaciones astronómicas en todo el espectro electromagnético, que comprende las siguientes bandas, citadas por orden de longitud de onda, desde la más larga a la más corta: ondas de radio, luz infrarroja, luz visible, luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Todas ellas aportan a los astrónomos información reveladora. Se pueden aprovechar las ventajas de cada modalidad para captar rasgos que sería difícil o imposible captar en otras bandas; la imagen de las págs. 106-107 ofrece algunos ejemplos de ello.

Algunas bandas son bastante aptas para la observación desde la superficie terrestre, mientras que otras solo son accesibles si los instrumentos de observación se llevan a mucha altitud en la atmósfera o incluso fuera de ella, en el espacio. En todos los casos, observar desde el espacio ofrece mayor poder de captación, aunque algunos instrumentos son demasiado voluminosos y pesados para enviarlos allí con la tecnología astronáutica actual.

A continuación damos un breve repaso a la utilidad que cada banda del espectro electromagnético tiene para la observación astronómica.

Las ondas de radio son ideales para detectar la presencia de nubes de gas frío en el espacio interestelar, así como la de púlsares. También permiten escrutar las inmediaciones de agujeros negros, entre otras utilidades.

Aunque son una franja de las ondas de radio, las microondas han cobrado mucho protagonismo como rama individual en los últimos años, esencialmente por la existencia del fondo cósmico de microondas, a menudo definido poéticamente como «el eco del Big Bang». Escudriñar el universo en microondas está ayudando a deducir algunas de las condiciones reinantes en él poco después del Big Bang.

La luz infrarroja, dependiendo de si pertenece a la longitud de onda más corta (la más cercana a la luz visible) o a la más larga o a la mediana, permite «sintonizar» estructuras de diferentes clases. Con ella es posible, por ejemplo, apreciar las estrellas más frías de entre las de un conjunto dominado en luz visible por las más calientes. Y también ver a través de mantos de polvo en regiones donde se están formando estrellas.

La luz visible es la que se ha venido usando tradicionalmente en la astronomía. Suele ser la ideal para observar estrellas y galaxias muy brillantes, y también ofrece vistas impresionantes de nebulosas cercanas.

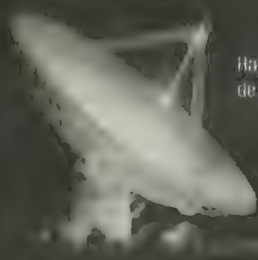
La luz ultravioleta permite discernir a las estrellas más calientes de entre las frías, ya que las primeras emiten en ultravioleta más que las segundas. En espectrografía, es muy útil para determinar la composición química de estrellas.

¿QUÉ PODEMOS HACER CON LA LUZ?

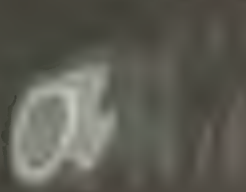
Una de las formas de observar el universo es a través de la luz. La luz que nos llega desde el exterior es captada por los instrumentos que utilizamos para observar el cosmos. Con el avance de la ciencia y la tecnología, se han podido emplear otras bandas del espectro electromagnético para escrutar el cosmos, y cada una tiene utilidades específicas. Aquí veremos de cada una de ellas una muestra de algo observado y de un instrumento empleado en esta banda; el instrumento que sirve de ejemplo no necesariamente está limitado a esa banda de luz, por lo que sea el mismo que ha hecho la observación. La orientación de cada instrumento respecto a lo observado no es libre.

ONDAS DE RADIO

Vecindario de un agujero negro

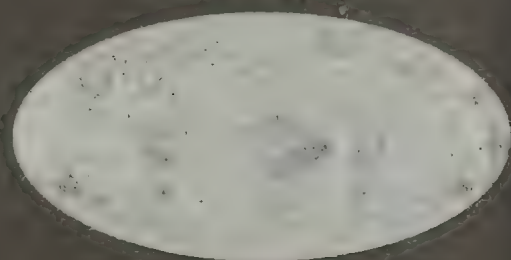


Radiotelescopio, para captar ondas de radio provenientes del cosmos



«Mapa» del fondo cósmico de microondas

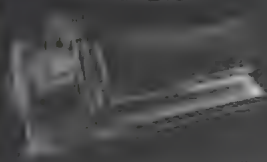
MICROONDAS



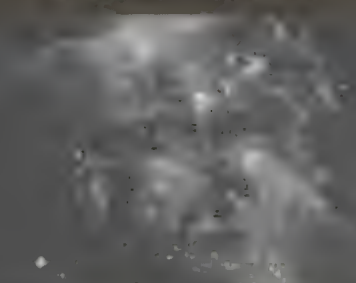
Satélite Planck

Mapa del fondo cósmico de microondas

LUZ INFRARROJA



Telescopio espacial Spitzer



LUZ VISIBLE

Observatorio de La Silla (ESO)



Telescopio espacial Hubble

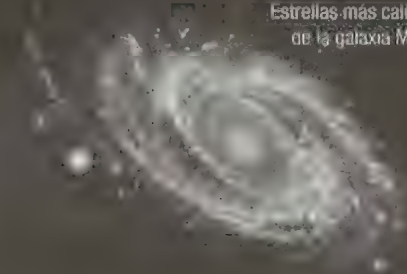


Nebulosa del Anillo (M57)

LUZ ULTRAVIOLETA

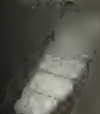


Satélite GALEX



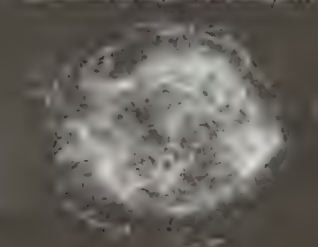
Estrellas más calientes de la galaxia M31

RAYOS X



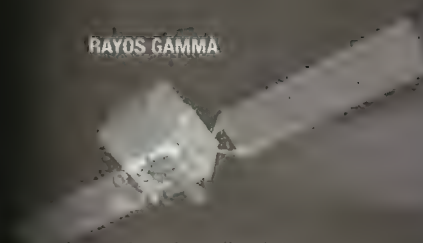
Satélite NuSTAR

Imagen de la burbuja de rayos gamma

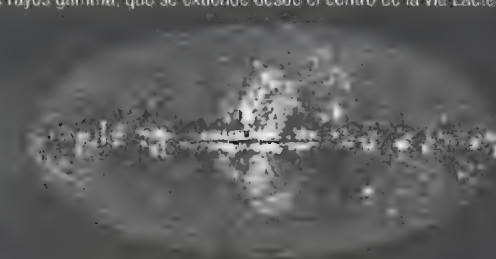


La zona más brillante en el centro de este mapa es una «burbuja» de rayos gamma, que se extiende desde el centro de la Vía Láctea

RAYOS GAMMA



Telescopio espacial Fermi



Las emisiones de rayos X denotan que en las fuentes emisoras hay gases a temperaturas elevadísimas, y a menudo indican la actividad ejercida en su entorno por objetos muy densos, como estrellas de neutrones o agujeros negros, que son «cadáveres» de estrellas destruidas por explosiones de supernova.

Por último, los rayos gamma, siendo la forma más energética de radiación electromagnética, están asociados a los fenómenos más violentos del universo, incluyendo supernovas, hipernovas y algunos de naturaleza todavía poco clara. Las emisiones de mayor potencia son de gran utilidad para la astronomía extragaláctica.

Del telescopio astronómico a los prismáticos

Los telescopios astronómicos producen una imagen invertida, lo que para la observación de las estrellas no tiene importancia; sin embargo, si queremos utilizar un telescopio para la observación de objetos lejanos de la superficie terrestre, ello no será adecuado, de modo que, entre el objetivo y el ocular suele situarse un sistema inversor, con el que conseguiremos que la imagen final esté orientada normalmente. Cuando este sistema está constituido por prismas, solemos llamar prismáticos al instrumento.

Los «anteojos de teatro» son otro tipo de telescopio en el que el objetivo es una lente convergente y el ocular una lente divergente. Los denominamos «galileo», teniendo como características fundamentales que su imagen no está invertida y que tienen pocos aumentos.

LA CÁMARA FOTOGRÁFICA: INMORTALIZANDO LA REALIDAD

Este es sin duda uno de los instrumentos ópticos formadores de imágenes más populares. Con él tratamos de hacer un registro permanente de un instante de la vida. Para ello formamos una imagen mediante un conjunto de lentes (el objetivo de la cámara), sobre una película que sea sensible a la luz. Si abrimos la cámara y en lugar de poner una película ponemos un folio de

papel blanco y disparamos para que se abra el *diafragma* y pase la luz, veremos que se forma sobre la hoja una imagen de aquello hacia lo cual apuntamos el aparato. Dicha imagen estará al revés y es real.

Acabamos de mencionar el *diafragma*. En efecto, todas las cámaras de fotografía tienen un elemento que aparenta ser un orificio circular y que llamamos de esta forma, el cual actúa

como el iris de nuestro ojo y por tanto se encarga de dejar pasar más o menos luz para formar la imagen. Normalmente el orificio está cerrado o tiene alguna lámina metálica que impide el paso de la luz hacia la película, pero al apretar el disparador, o bien se abre o se levanta la lámina, permitiendo, durante un breve tiempo, que pase luz, formándose la imagen sobre la película fotográfica. Con una buena cámara se puede variar el tamaño del *diafragma* y el tiempo durante el que se expone la película a la luz.

La película fotográfica está formada por cristallitos de sustancias fotosensibles, de manera que cuando les llega la luz sufren una transformación química convirtiéndose en otra sustancia. Así se registra la imagen: allí donde había más luz se dará en mayor grado la reacción fotoquímica y donde había menos se producirá en menor medida.

Podría parecer que estamos hablando del pasado, ya que en la actualidad se utilizan mayoritariamente cámaras digitales, ya sean individuales o integradas en los teléfonos móviles. Pero en estas lo que cambia básicamente, con respecto a las «antiguas», es el medio de registro: en vez de en una película fotográfica la imagen se registra sobre una «matriz» de numerosos elementos fotodetectores. Estos elementos proporcionan una respuesta eléctrica (generan una corriente eléctrica o una diferencia de potencial) a la luz. Si con la película convencional, al colocar la imagen sobre ella, se generaba una respuesta fotoquímica tal que el ennegrecimiento que se daba en cada punto era proporcional a la luz que caía sobre la misma, con la matriz de fotodetectores la respuesta eléctrica es la que es proporcional a la luz que forma la imagen en cada punto. La extensión de cada elemen-

El contraste es lo que hace interesante a la fotografía.

CONRAD HALL

IMÁGENES HIPERESPECTRALES

En el mundo de las imágenes digitales el término hiperespectral ha adquirido una gran importancia. El hecho de que las cámaras digitales de *Pixel Camera*, *Ultara*, *Orbicle*, *Rejo*, *Sondeo* y *Visual* funcionan con una cámara digital han hecho que una fotografía, en la actualidad, en el que cada píxel de la imagen digital tiene un color correspondiente a la respuesta de tres sensores, los canales rojo, verde y azul del espectro. Por combinación de las tres cantidades se obtiene el color del píxel correspondiente. En una imagen en blanco y negro, como se ve en la figura, solo tendríamos un sensor, y la representación de la imagen solo tendría niveles de gris.

Ampliando el abanico sensorial

Desde hace unas pocas décadas, el interés se ha centrado en conseguir imágenes con un mayor número de sensores, por lo que se habla de imágenes *multiespectrales*, *hiperespectrales* o *ultraespectrales*, según tengamos en cada píxel una respuesta de la cámara de 4 a 9 sensores, de 10 a 60, o de más de 60, respectivamente. Se captan entonces las imágenes en *bandas*, correspondiendo cada una a un sensor de sensibilidad espectral distinta. Así por ejemplo, si obtenemos imágenes con filtros que dejan pasar aproximadamente la información en torno a una longitud de onda, y las captamos de este modo en el espectro visible (de 400 a 700 nm, en intervalos de 10 nm), obtendremos un total de 31 imágenes, es decir, en cada píxel de la imagen obtendremos 31 valores. A ello se le llama imagen hiperespectral.

Aplicaciones diversas

La información espectral de una imagen, o sea, longitud de onda y intensidad de onda, es muy útil, en especial para identificar materiales. Por ejemplo, en medicina se usa para identificar tumores a partir de preparaciones para microscopía o para caracterizar enfermedades en la piel. En agricultura y en medio ambiente se obtienen imágenes multiespectrales o hiperespectrales en el infrarrojo con satélites o drones, para determinar estados de cultivos o grado de sequía.

Imágenes de una mano obtenidas mediante escaneo hiperespectral. Los diversos patrones revelan información de distinto tipo.



to fotodetector se denomina *píxel*, de modo que si una máquina dispone de, por ejemplo, 2,1 megapíxeles, ello quiere decir que la matriz tiene 2 100 000 píxeles. Cuando hacemos una foto con esta cámara, las 2 100 000 respuestas eléctricas se guardan en la memoria electrónica del aparato y luego pueden ser transferidas a un ordenador. Tenemos entonces lo que se llama imagen digital. Por otro lado, en una matriz de detectores no todos suelen ser iguales, sino que son de tres tipos distintos: unos más sensibles al rojo, otros al verde y otros al azul, lo que da lugar a que las llamen *cámaras RGB* (por las siglas en inglés de *Red, Green, Blue*).

ESPECTROS PARA EL ANÁLISIS

En un capítulo anterior describimos el concepto de espectro de luz e, incluso, detallamos un par de elementos ópticos, los prismas y las redes de difracción, que se emplean para conseguir buenos espectros. Asimismo, hemos indicado que descomponer la luz en sus componentes espectrales nos da información sobre la fuente que la emite, y que hacer pasar luz, descompuesta espectralmente, por determinadas sustancias nos proporciona información sobre las mismas. Vamos a detallar ahora algo más esta última aplicación, describiendo someramente el instrumento llamado *espectrofotómetro*, si bien existen otros con los que se consiguen o manipulan espectros con fines diversos, concretamente: los *espectrorradiómetros*, los *espectrógrafos*, los *espectrómetros* o los *espectrogoniómetros*.

Con los espectrofotómetros se pretende medir la absorbancia (o transmitancia) espectral de, por ejemplo, una disolución, y por tanto, la absorción que puede presentar un medio transparente a distintas longitudes de onda. Según se quiera medir la absorción en el ultravioleta, el visible o el infrarrojo, el espectrofotómetro tomará una de estas zonas del espectro electromagnético como calificador. En cualquier caso, el instrumento especificará en sus características el intervalo espectral en el que se mide dicha magnitud. Por ejemplo, entre 400 y 800 nm, es decir, en el visible y algo del infrarrojo cercano.

El espectrofotómetro estará dotado de una lámpara que emita radiación en cantidad suficiente de las longitudes de onda en las que se pretende medir. Además, poseerá un elemento que abra dicha luz produciendo su espectro, normalmente una red de difracción, y algún sistema que nos permita seleccionar una a una las luces de las distintas longitudes de onda. Esta parte del instrumento se llama *monocromador*. Hay que apuntar que no vamos a poder seleccionar nunca la luz de una sola longitud de onda, sino de un intervalo más o menos estrecho en torno a la longitud de onda que queramos escoger.

Una vez seleccionada la luz, esta se hace pasar por el medio transparente del que se quiere determinar aquello que la absorbe, por ejemplo, una disolución en una cubeta. Se mide entonces el tanto por ciento de la luz absorbida, comparando la cantidad de luz que deja pasar la disolución con la que pasa si se pone la cubeta sin ella. Algunos espectrofotómetros son de doble haz, ya que dividen la luz incidente en dos haces para hacer simultáneamente la medida con disolución y sin ella.

Conviene recordar en este punto que, según la ley de Lambert-Beer, la absorbancia va a depender de la cantidad de medio transparente atravesado por la luz, y por tanto, en este caso, del espesor de la cubeta.

En estos instrumentos, el detector de radiación empleado es también una parte fundamental. Como hemos dicho, se compara la cantidad de luz que atraviesa la disolución con la incidente en ella, es decir, debemos «medir» la cantidad de luz. Para ello nos hace falta un elemento que proporcione una respuesta medible a la luz que llega, como un fotodetector o detector de radiación. Recordemos que la luz es un tipo de energía y que puede convertirse en otro que podamos medir. Si un dispositivo, por ejemplo un fotodiodo de silicio, es capaz de dar una respuesta eléctrica cuando le llegue luz, como una diferencia de potencial, entonces podremos medir esta con un voltímetro. Y así, midiendo voltios, podremos medir vatios de energía luminosa, si de alguna manera hemos calibrado el dispositivo de medida y relacionado los voltios generados con una cantidad de luz conocida.

EL LASER, LUZ COHERENTE

El láser es una fuente lumínica que ha revolucionado parte de la ciencia y de la técnica y que ha ampliado las posibilidades de lo que se puede llegar a hacer con la luz. Se afirma a menudo que basa su utilidad en tres propiedades fundamentales: *direccionalidad, potencia y coherencia*. Lo que sucede realmente es que presenta, o puede presentar, cualquiera de las tres en mucho mayor grado que las fuentes de luz convencionales.

La direccionalidad implica que la emisión que se genera en un láser es tal que su luz se halla confinada en un haz estrecho, o sea, un cilindro de pequeño diámetro. Frente a las fuentes de luz convencionales, que como hemos visto emiten en todas direcciones, el láser emite la suya en una sola. Ello presenta ventajas indudables a la hora de «manejarla», ya que puede ser dirigida fácilmente a un lugar o a otro mediante espejos. Además, al estar confinada en un estrecho haz, si la luz emitida se concentra mediante lentes pueden obtenerse cantidades elevadas de energía. Esta direccionalidad hace que si encendemos nuestro puntero láser no veamos la trayectoria que sigue la luz y sí el punto de la pantalla sobre el que incide. No olvidemos que para verla tendría que llegar luz hasta nuestro ojo, lo que ocurriría solo si en su camino se encontrara con partículas de polvo en suspensión que la difundieran en todas direcciones, como sucede en el punto de la pantalla en el que incide, permitiéndonos verlo.

Entre otras clasificaciones podemos distinguir diferentes tipos de láseres según sean de emisión *continua* o *pulsante*. Estos últimos son aquellos que en vez de emitir luz continuamente lo que hacen es emitir pulsos de luz ultracortos, presentando una gran cantidad de aplicaciones. Estos pulsos pueden durar microsegundos, nanosegundos, picosegundos e incluso femtosegundos (o sea, de millonésimas a milbillonésimas de segundo) y pueden ser extremadamente energéticos.

En cuanto a la potencia podemos apuntar que existen láseres de potencias muy variadas, desde menos de 1 mW (milivatio) hasta varios kilovatios en emisiones continuas, refiriéndonos

siempre a la potencia luminosa emitida. En el caso de los pulsantes se habla de julios en el pulso de luz, es decir, de energía. Con láseres se puede cortar o soldar metal. También se quiere iniciar con ellos el proceso de la fusión nuclear controlada, para lo que hacen falta cantidades de energía muy elevadas.

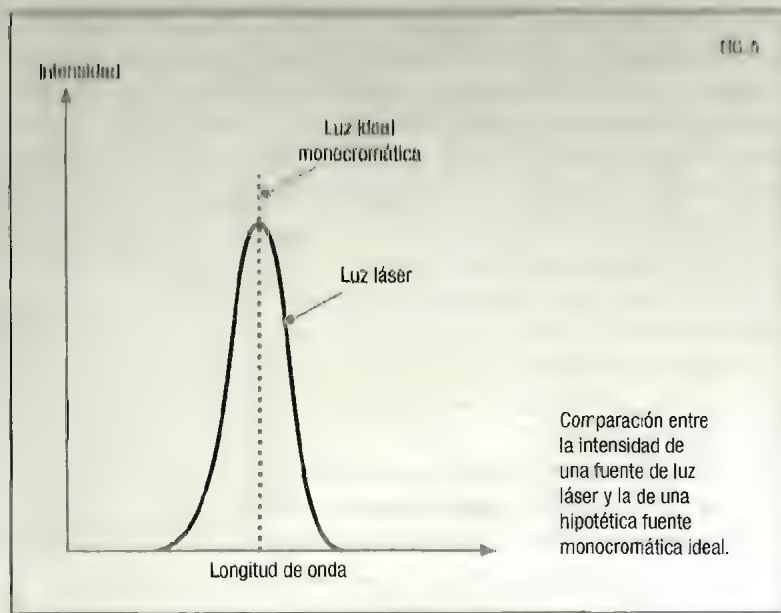
Aun con láseres de muy baja potencia, no debemos dirigir nunca su emisión hacia nuestro ojo, ya que el cristalino concentraría todavía más su energía, pudiendo producir daños muy graves o irreparables en la retina.

La última de las propiedades, la coherencia, es la que puede parecer más extraña y sin embargo es, tal vez, la más importante. Esta propiedad se refiere a la posibilidad de obtener luz que casi se corresponda con una onda de una sola longitud de onda. Con el láser obtenemos luz que es «cuasimonocromática». Como hemos indicado, y nos señala el principio de incertidumbre, no es posible obtener una fuente de luz que emita en una única longitud de onda o frecuencia, lo que llamamos luz monocromática. A pesar de todo, la luz emitida por un láser puede cumplir casi por completo este requerimiento teniendo un ancho de banda espectral muy estrecho, es decir, teniendo una emisión muy importante en una longitud de onda y que su emisión decaiga rápidamente para las longitudes de onda próximas a ella. En la figura 5 se representa la intensidad de la luz emitida por una fuente ideal monocromática y la intensidad de la emitida por una fuente láser.

Gracias a esta propiedad decimos que un láser es una fuente de luz de alta coherencia, frente a las lámparas de incandescencia o tubos fluorescentes, los cuales calificamos como incoherentes. En estos casos les adjudicamos dicho calificativo no solo porque emitan luz policromática, luz blanca, sino porque debido a su extensión consideramos que los distintos puntos del filamento de tungsteno o del tubo emiten luz con total independencia unos de otros, careciendo de coherencia entre sí.

Hoy en día existen relativamente pocos experimentos en física atómica que no requieran el uso de un láser.

ERIC ALLIN CORNELL



Hemos dejado para el final el significado de la palabra láser. Se trata de un acrónimo de la expresión inglesa *light amplification by stimulated emission of radiation* (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación). Tomemos las primeras letras de las palabras principales y obtendremos «láser». Como indica la expresión inglesa, conseguimos luz, que puede ser de alta intensidad, mediante la amplificación de algo que llamamos *emisión estimulada de radiación*. Cómo se consigue esa amplificación es algo que nos alejaría de los objetivos de este libro. Sin embargo, algo podemos decir sobre ello.

Fue Einstein quien predijo que en un colectivo atómico o molecular, además de emisión espontánea, puede haber una emisión estimulada. Cuando un conjunto de átomos sufre una excitación, por ejemplo el gas contenido en una ampolla sometido a una descarga eléctrica, puede emitir radiación al desexcitarse y perder energía. Suele darse entonces lo que se llama una emisión espontánea de radiación. Pero también puede favorecerse la emisión de la luz de una longitud de onda, si es posible que la



La fotografía superior muestra a un científico militar experimentando con un haz láser. El uso más común de la fibra óptica (abajo) es transmitir información, pero puede tener otras aplicaciones, algunas de ellas sorprendentes, como la ideada por un equipo de la Universidad Carlos III de Madrid, en España: como termómetro para mediciones en procesos industriales de mecanizado o corte en situaciones para las cuales no sirven las técnicas convencionales.

emita el colectivo, por la presencia misma de dicha radiación. La luz de una longitud de onda pasando por el gas puede inducir la emisión de más luz igual a ella. Esta es, en pocas palabras, la idea original de Einstein y a lo que llamamos *emisión estimulada*. Conseguir mucha de esta emisión en una longitud de onda es el objetivo para el que diseñamos los láseres.

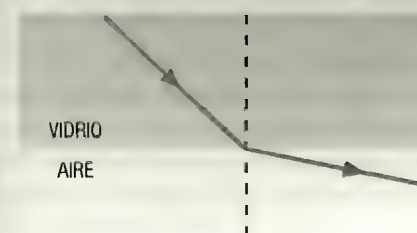
A menudo se oye hablar de láseres de CO_2 , de Nd-YAG, de He-Ne, de Ar, etc. Estos nombres se refieren al medio en el que se produce la emisión estimulada. Cada láser suele emitir en una longitud de onda o en varias en función del dispositivo interno. Por ejemplo, si el medio activo que constituye el láser es una mezcla de helio y neón, emite a 632,8 nm. El láser de He-Ne es uno de los láseres más populares. Lo que no existe aún es un láser realmente sintonizable, es decir, con el que se puedan fácilmente conseguir radiaciones cuasimonocromáticas con solo utilizar un botón. Así pues, disponemos de láseres en los que la radiación coherente se consigue en una o en pocas y determinadas longitudes de onda. Afortunadamente tenemos láseres que emiten radiación visible y también en el ultravioleta y el infrarrojo. Los láseres que emiten en el rango de las microondas, y que fueron construidos antes de los que emiten luz visible, se llaman *másers*.

FIBRAS ÓPTICAS, VÍAS DE TRANSPORTE DE LA LUZ

Las fibras ópticas podemos compararlas a hilos de material transparente en los que se propaga luz gracias al fenómeno de la *reflexión total*. Un simple hilo de nailon se comporta como una fibra óptica.

Hemos visto que cuando la luz se encuentra una superficie de separación de dos medios, como el aire y un vidrio o plástico, parte de ella se refleja y parte se refracta. Ocurre lo mismo cuando pasa de vidrio o plástico a aire. En este caso la luz reflejada se separa de la perpendicular a la superficie de separación (figura 6), según la ley de la refracción. Si el ángulo de incidencia es lo suficientemente grande la luz refractada emerge cercana a la su-

FIG. 6



Cuando el ángulo de incidencia de la luz sobre la frontera entre dos medios (en este caso vidrio y aire) es lo bastante grande, el haz refractado emerge con una desviación pequeña con respecto a dicha frontera.

FIG. 7

Con un ángulo de incidencia sobre la frontera entre dos medios mucho mayor que el mostrado en la figura 6, la luz no se refracta, sino que toda ella se refleja.

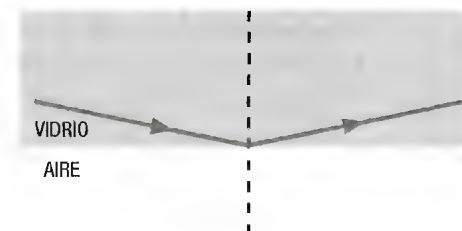
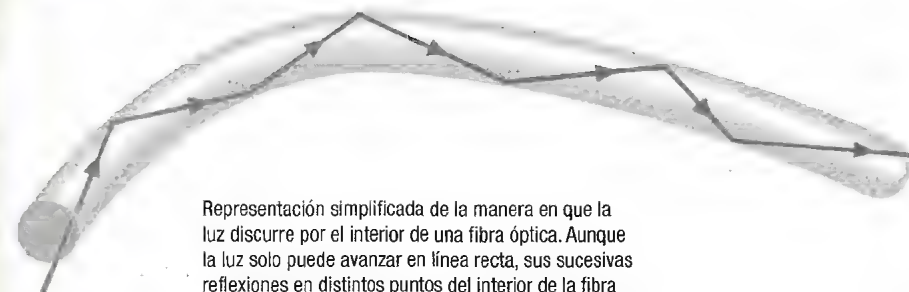


FIG. 8



Representación simplificada de la manera en que la luz discurre por el interior de una fibra óptica. Aunque la luz solo puede avanzar en línea recta, sus sucesivas reflexiones en distintos puntos del interior de la fibra le permiten sobrepasar las curvas de dicha fibra.

perficie, como se ve en la misma figura. Si aumentamos aún más el ángulo de incidencia (figura 7), no hay refracción y toda la luz se refleja. Es el fenómeno que llamamos *reflexión total*.

En una fibra óptica la luz sufre sucesivas reflexiones totales y así se propaga aunque la fibra se curve (figura 8). De esta forma podemos «curvar» la luz y transportarla a zonas a las que sería

difícil llevarla de otro modo. Por ejemplo, en las gastroscopias se desea ver el estómago tomando una imagen de él. Para ello hace falta iluminarlo y captar su imagen. Gracias a un cable de fibra, es decir, un haz de fibras ópticas, podemos introducir luz en el estómago a pesar de las curvas que sufre el cable al pasar por la boca, la garganta y el esófago. Además, de regreso, la luz nos permite formar una imagen de la zona iluminada. Este ejemplo no es más que uno de los muchos en los que se usa fibra óptica en medicina y que han permitido grandes avances en este campo, ya que poder ver distintas partes internas de nuestro cuerpo permite diagnosticar con mayor precisión.

En las comunicaciones, el conjunto de fibra óptica+láser está sustituyendo al tradicional de cable de cobre+microondas. La electrónica nos dice que el número de conversaciones telefónicas simultáneas que pueden ser transmitidas por un cable es proporcional a la frecuencia de la radiación portadora de dichas conversaciones. Sustituir las microondas por luz, en realidad no visible sino del infrarrojo cercano (la banda adyacente, por longitud de onda, a la luz visible), nos permite trabajar con frecuencias mucho mayores. Además, utilizar láseres posibilita aumentar la distancia entre los repetidores que recogen y amplifican la señal en la transmisión.

Para las comunicaciones ópticas hace falta un medio transparente al infrarrojo empleado y que en él se transmita la radiación de forma adecuada. Dado que las fibras ópticas lo permiten, la telefonía tradicional ha abrazado casi totalmente las nuevas tecnologías que nos suministran estas, posibilitando aumentar espectacularmente la capacidad de transmisión, en una época en la que hay grandes exigencias de trasvase lejano de información motivadas por la aparición de internet.

DETECTORES: CAPTANDO LA LUZ

A lo largo de esta exposición hemos puesto de manifiesto lo necesarios que son los detectores de luz. Nuestros ojos disponen de células sensibles a ella que al ser impresionadas generan una

respuesta eléctrica que se transmite al cerebro para conseguir la percepción visual. Hemos mencionado también las películas fotográficas en las que la luz provoca una reacción química. Otros materiales generan una diferencia de potencial, una intensidad eléctrica o un cambio de resistencia eléctrica cuando les llega luz. Hablamos entonces de *fotodiodos*, *elementos fotoconductivos*, *fotorresistencias*, *bolómetros*, etc. En otros dispositivos la luz genera un cambio de temperatura (*termopares* y *termopilas*), un cambio de presión, o una corriente de electrones (*fotomultiplicadores*).

Como vemos son muchos los materiales que dan una respuesta de algún tipo a la luz y con ellos podemos detectarla, medirla o transformarla en otro tipo de energía. Algunos están muy cerca de nosotros, y no nos referimos a nuestros ojos. Cuando usamos el mando a distancia del televisor, el del reproductor de DVD, etc., emitimos con ellos una radiación infrarroja que es detectada por un sensor en el aparato. Hay personas que disponen en casa de placas solares con las que se convierte luz en energía eléctrica. O pensemos también en el sensor de un ascensor que detecta si una persona pasa por su puerta, al interrumpir un haz lumínico.

Cualquier detector presenta una serie de características que están ligadas al uso que se le quiera dar: el intervalo espectral al que es sensible el detector (habrá detectores para zonas del visible, del infrarrojo, etc.); la detectividad, o mínima cantidad de radiación que es capaz de detectar; la linealidad, o intervalo de intensidades en el que la señal generada por el detector es linealmente proporcional a la cantidad de radiación incidente en él; la sensibilidad espectral, ya que los fotodetectores no suelen ser sensibles por igual a todas las longitudes de onda; la señal de oscuridad, que es la respuesta que da el detector aunque no le llegue radiación, y el equivalente señal-ruido, que nos da idea del valor de las fluctuaciones en la señal generada por un fotodetector, ya que todos los detectores tienen un cierto nivel de «ruido» al medir, o sea, que proporcionan un valor que oscila a partir de una determinada cifra significativa. En definitiva, las características del detector lo harán apto para cada tipo de tarea.

OTRAS APLICACIONES

Lo que podemos hacer con la luz es muy variado y sus aplicaciones muy diversas. Incluso centrándonos en lo que se hace en un laboratorio, en el que se desarrollan técnicas ópticas de análisis, de aplicación en química, biología y geología, podríamos hablar de multitud de ellas (fluorimetría, fosforimetría, nefelometría, turbidimetría...). Los fundamentos de algunas de estas técnicas los hemos expuesto en un capítulo anterior.

Ampliaremos ahora el concepto de polarimetría, mencionado con anterioridad, para ver qué utilidad tiene. Ya vimos lo que es la luz linealmente polarizada. Algunas sustancias, como las disoluciones de sacarosa o glucosa, presentan la propiedad llamada *actividad óptica*. Cuando se hace pasar luz linealmente polarizada por estas sustancias, esta va rotando su plano de polarización conforme las atraviesa. Si tomamos un tubo de longitud determinada y hacemos este experimento podremos comprobar que el ángulo girado por el plano de polarización es directamente proporcional a la concentración en azúcares de la disolución. Al instrumento que mide dicho giro se lo conoce como sacarímetro o analizador de penumbra, y a la técnica se la llama polarimetría. Dicha técnica también se puede realizar longitud de onda a longitud de onda y entonces se denomina *espectropolarimetría*.

Otras técnicas no descritas hasta ahora han sido las de *refractometría*. Estas tienen como fin la medida de índices de refracción, tanto de sólidos como de líquidos y gases, o el estudio de su variación con la presión, la concentración o la temperatura. Para ello se desarrollan instrumentos, llamados *refractómetros*, basados en los fenómenos de refracción, de refracción total o de interferencias. Con estos últimos se consiguen precisiones muy altas. En cualquier caso, la medida de índices de refracción es un arma potente para caracterizar a medios materiales y, por tanto, es muy empleada en análisis químico.

La mayoría de estas técnicas son de uso habitual en la industria química y en los laboratorios de investigación, pero quedan muy lejos de nuestra vida cotidiana. Sin embargo, la refractometría es más usada de lo que nos podamos imaginar. La razón fun-

damental radica en que el índice de refracción de una disolución varía de forma lineal con la concentración. Así, por ejemplo, un agricultor que esté pendiente de realizar la vendimia puede, en la misma viña, coger una uva y poner una gota en el refractómetro, con lo cual sabrá si tiene la cantidad adecuada de azúcares y, por tanto, vendimiar, o esperar unos días para que madure más.

Actuando de forma similar, pueden medirse concentraciones de azúcares en bebidas, grados de alcohol o concentraciones de determinados compuestos en análisis clínicos. Incluso puede ser una técnica clave en gemología, ya que la determinación del índice de refracción de una determinada piedra preciosa puede ser un parámetro esencial para caracterizarla. En definitiva, la refractometría es una técnica de análisis utilizada en múltiples campos, con las ventajas de necesitar muy poco producto y ser muy fácil de realizar.

¿Cómo vemos?

El sistema visual es extraordinario. Gracias a la luz podemos ver y relacionarnos con nuestro entorno de forma fundamental. Conocer cómo vemos y gracias a qué mecanismos lo hacemos ha interesado a la humanidad desde hace muchos siglos y nos ha permitido desarrollar instrumentos para superar los límites de la visión.

La luz se distingue del resto de las radiaciones porque es capaz de estimular el sistema visual, permitiéndonos ver. De los cinco sentidos, que son las vías de comunicación de nuestro cuerpo con el mundo exterior, el que recibe mayor información es el de la visión. El soporte de dicha información es la luz.

Al abrir los ojos y permitir el paso de la luz que viene de los objetos que nos rodean, comienza un proceso en el que se ven involucrados los ojos y el cerebro, cuyo resultado final es la percepción visual. Dicha percepción del mundo que nos rodea nos permite tomar decisiones y actuar sobre nuestro entorno. La visión es una vía crucial de comunicación con el mundo externo.

Es muy importante conocer las características fundamentales de la visión, y en especial sus límites, ya que, aunque muchos de nosotros creamos que vemos muy bien, nuestra capacidad de captación de información a través de la vista es limitada. Pensemos, por ejemplo, en que somos capaces de ver detalles de un determinado tamaño, como la trama de un tejido, pero en cambio no vemos el interior de los hilos. O fijémonos en una palabra de estos reglones: si no movemos la cabeza ni los ojos, seguro que no leeremos con claridad las palabras

que están al lado de aquella en la que hemos centrado nuestra atención.

Seremos más conscientes de estas limitaciones si repasamos el sistema visual, la formación de imágenes en el ojo y su capacidad para formarlas de objetos situados a distintas distancias (*acomodación*), así como los defectos oculares más comunes que afectan a la población (*miopía*, *hipermetropía*, *astigmatismo* y *presbicia*). También es importante abordar la exposición de algunas características de la visión relacionadas con la percepción de detalles (*agudeza visual*), la visión del color y la percepción de la profundidad.

EL SISTEMA VISUAL: UN SISTEMA COMPLEJO

Normalmente asociamos en exclusiva la visión a nuestros ojos. Pero en realidad vemos gracias a ellos y a nuestro cerebro. En los primeros se forman las imágenes del mundo exterior. En el segundo estas se procesan y tiene lugar la percepción visual. Lo que conocemos como *sistema visual* comprende los ojos y las partes del cerebro involucradas en dicha percepción. Y aún es mucho lo que queda por descubrir del mismo, en especial de la mencionada segunda parte.

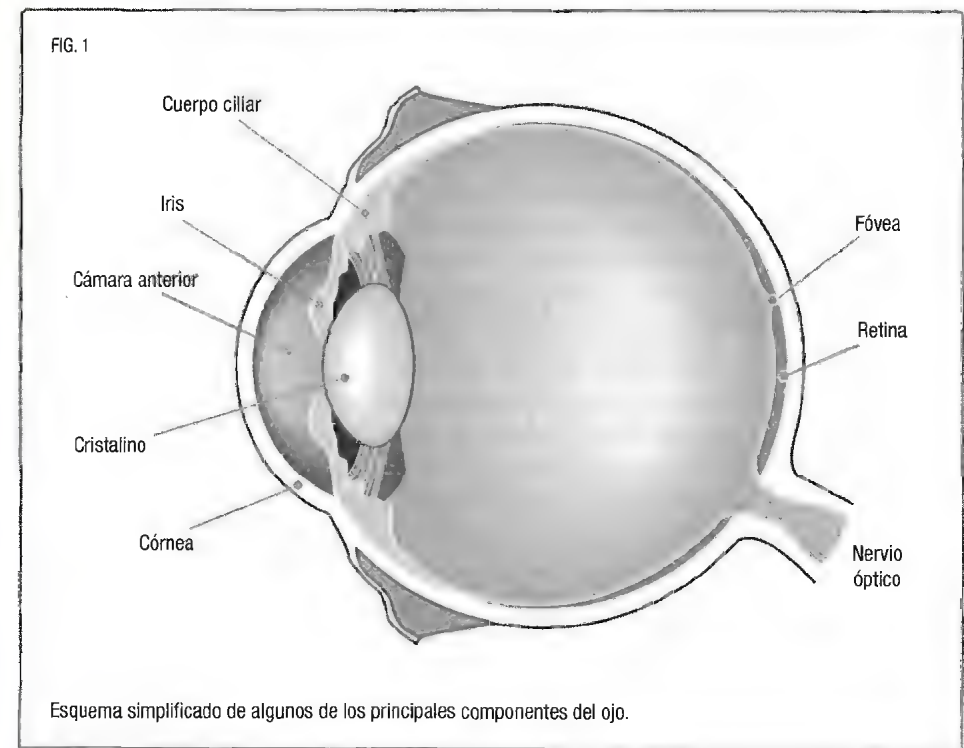
La primera función del sistema visual es obtener imágenes de la escena que observamos. Para ello cada ojo actúa como un sistema generador de imágenes, las cuales se forman sobre una pantalla que llamamos *retina*, que está situada en la parte posterior del ojo y que consiste en una «red» de células nerviosas que consiguen convertir las imágenes en señales eléctricas y transmitir las al cerebro a través de las fibras del *nervio óptico*.

En la figura 1 mostramos un esquema básico del ojo en el que destacamos las partes principales sobre las que hablamos a continuación. En primer lugar nos fijaremos en el sistema óptico. Para formar imágenes el ojo dispone de dos lentes: la *córnea* y el *cristalino*. El conjunto de estas dos lentes ha de ser muy potente, ya que debe formar imágenes en un corto espacio: la retina dista de la córnea entre 24 y 25 mm. Por tanto, el sistema

de lentes ha de hacer converger la luz para formar la imagen en una escasa distancia.

De las dos lentes, la más potente es la *córnea*. Tal como se aprecia, su forma nos recuerda la de las lentes que llevan las gafas o la de las lentes de contacto, es decir, de tipo menisco. La otra lente, el *cristalino*, es sin embargo de las llamadas bi-convexas. No es tan potente como la *córnea* pero es flexible y puede cambiar su forma, mediante la presión del músculo que la rodea, el *músculo ciliar*, ubicado en el cuerpo ciliar. Dicho cambio de forma implica un cambio de potencia en el cristalino y, como consecuencia, del ojo completo, lo cual es fundamental en el proceso de la acomodación (enfoque).

La acción conjunta de ambas lentes permite que formemos imágenes reales, más pequeñas e invertidas, en la retina, de los



cuerpos observados (figura 2). Que la imagen sea invertida no es óbice de una visión precisa, ya que el cerebro procesa las imágenes de ambos ojos, las fusiona y proporciona una percepción única y correctamente presentada.

Ningún objeto es misterioso. Tu ojo es el misterio.

ELIZABETH BOWEN

De la parte óptica del ojo es preciso mencionar también el diafragma, que llamamos *iris*. Este, situado delante del cristalino, lo abrimos de forma relativamente involuntaria, dejando pasar más o menos luz para formar la imagen. Cuando hay poca en la escena lo abrimos para captar toda la posible, y cuando hay mucha lo cerramos para protegernos del exceso en la imagen. Es habitual vivir situaciones que pongan de manifiesto esta apertura y cierre de la *pupila*: por ejemplo, cuando venimos de una iluminación muy intensa y pasamos a un lugar con muy poca, apenas vemos nada, pero dejando pasar unos segundos empezamos a ver mejor. En la situación contraria, decimos que estamos deslumbrados y unos instantes después ya nos adaptamos a la nueva situación. A pesar de todo, quizá no la hayamos visto abrirse y cerrarse, lo cual podemos conseguir con una experiencia muy sencilla. Si nos situamos muy próximos al espejo de nuestro cuarto de baño teniendo una iluminación muy tenue (por ejemplo, disponiendo solo de la iluminación del pasillo) podremos ver nuestra pupila muy abierta, e incluso con una regla milimetrada medir su diámetro. Si a continuación encendemos las luces del baño, veremos cómo se cierra rápidamente. Si después volvemos a apagar la luz, observaremos que empieza a abrirse de nuevo, pero ahora con más lentitud. Análogamente, puede observarse este fenómeno mirando la pupila de una persona próxima en un ambiente poco luminoso y haciéndole incidir la luz de una linterna. Es interesante repetir la experiencia diciéndole al sujeto que mantenga su otro ojo cerrado, en la primera situación, y después manteniéndolo abierto. Podremos apreciar que la pupila del ojo sobre el que no llega la luz de la linterna también cambia de tamaño.

Como hemos indicado, la imagen debe formarse sobre la retina. Esta dispone de dos tipos de células sensibles a la luz: los



conos y los *bastones*, cuyas misiones son distintas. De hecho, podemos pensar en un comportamiento desdoblado de la visión según actúen unos u otros. Así, cuando vemos con una cantidad de luz abundante, por ejemplo al mediodía, los que actúan son los conos, que nos permiten ver el color y percibir bien los detalles de un objeto, sobre todo si la imagen se forma sobre la zona de la retina en la que su densidad es mayor, que llamamos *fóvea* (véase la figura 1). En efecto, cuando vemos algo bien y con detalle es porque su imagen se está formando en esta zona del ojo. Si nos fijamos en una palabra de este texto y la vemos correctamente, eso es lo que está ocurriendo. El resto de las palabras, que ya no se ven tan nítidas, forman sus imágenes en zonas de la retina fuera de la *fóvea*, donde hay tanto conos como bastones, en particular estos últimos.

Los bastones son sensibles a cantidades bajas de luz, a las que los conos no lo son. Cuando hay poca luz no observamos el color y los detalles no se ven bien; de aquí procede el dicho popular de que «por la noche todos los gatos son pardos». Un buen ejemplo de visión con los bastones lo tendríamos durante un paseo a la luz de la Luna. Es curioso que en el sistema visual exista esta dualidad de funciones: unos detectores para cantidades de luz bajas y medias (bastones) y otros para medias y altas (conos).

Ello nos permite ver bajo cantidades de luz muy diversas. En condiciones de iluminación media actúan simultáneamente bastones y conos, es decir, no hay una interrupción entre el trabajo de unos y otros.

Con el color se obtiene una energía que parece derivar de la hochicoría.

HENRI MATISSE

ponga en marcha un ciclo en el que dicha sustancia se convierte en otra y genera un impulso nervioso (de tipo eléctrico). El ciclo se cierra con la regeneración del fotopigmento a través de la acción de la vitamina A.

Existen tres tipos de conos, uno de mayor sensibilidad a las longitudes de onda cortas del espectro visible, otro a las medias y un tercero a las largas. De ahí que se suela hablar de conos L, M y S (según las iniciales en inglés de longitudes de onda largas, medias y cortas, respectivamente), por la zona del espectro visible en la que presentan mayor sensibilidad. También se les denomina conos rojos, verdes y azules, en el bien entendido de que los nombres indican en qué lugar del espectro presentan mayor sensibilidad, no que no sean sensibles a las demás longitudes de onda. Esta es una de las causas de que permitan la visión del color.

Las señales eléctricas generadas por conos y bastones se transmiten a otros tipos de neuronas en la misma retina: bipolares, amacrinas, horizontales y ganglionares, saliendo de estas últimas las fibras que conforman el nervio óptico, el cual se dirige al cerebro. La información que porta el nervio óptico pasa por distintas zonas del cerebro: el quiasma óptico, el núcleo geniculado lateral, la corteza cerebral y las zonas profundas. El procesamiento de dichas señales, que comienza en la retina y que sigue en el cerebro, tiene como resultado la percepción visual completa. Tengamos en cuenta que cuando miramos un objeto o escena, a partir de las imágenes obtenidas en la retina noso-

Tanto conos como bastones son células fotosensibles, es decir, células que dan una respuesta a la luz que reciben. Para ello están dotadas de un tipo distinto de fotopigmento. Cuando les llega la luz comienza una reacción fotoquímica que hace que se

tros percibimos si es más o menos claro, su color, los detalles en el mismo, su textura, reconocemos su forma, si se mueve y su profundidad. Todo este proceso, que es la percepción visual completa, implica una elaboración de información que realiza fundamentalmente el cerebro.

LA ACOMODACIÓN DEL OJO

Al ojo humano le exigimos que forme en la retina buenas imágenes de objetos que pueden estar situados desde muy lejos hasta muy cerca. Para ello dispone de un mecanismo que llamamos *acomodación*, que consiste en el abombamiento del cristalino mediante la acción del músculo ciliar cuando se quiere pasar de observar un objeto lejano a otro cercano. Así, cuando miramos un objeto lejano, el cristalino adopta su posición más estirada. Se dice entonces que está relajado. Afortunadamente esto es así, ya que en la vida cotidiana, salvo en personas que dedican muchas horas al trabajo intelectual o a algunas actividades manuales en las que hay que colocar muy cercanos los objetos, la mayor parte del tiempo mantenemos los ojos abiertos para ver objetos lejanos, entendiendo por estos los situados a más de 5 o 6 metros. En estas condiciones el esfuerzo que tiene que hacer el músculo ciliar es pequeño o nulo y no nos cansamos al ver.

Cuando acercamos un objeto para verlo, exigimos más potencia al cristalino. A través de los ángulos representados en la figura 3, apreciamos que la luz que viene de un cuerpo lejano entra en el ojo menos abierta (divergente) que la de otro cercano. El sistema córnea + cristalino ha de hacer converger los rayos para formar la imagen en la retina, así que requiere más potencia cuando los rayos que entran divergen más (cuerpo cercano). Este aumento de potencia lo realiza el cristalino mediante su abombamiento, convirtiéndose en una lente más gruesa y de mayor curvatura en sus caras.

Con una cámara fotográfica réflex, para enfocar objetos en distintos planos se desplaza el objetivo con respecto a la película

(o al sensor en las cámaras digitales). Esto no puede hacerlo el ojo humano. Gracias al mecanismo de la acomodación resolvemos ese problema y podemos formar imágenes en la retina de objetos muy lejanos o muy próximos. La capacidad de abombamiento del cristalino es, sin embargo, limitada. La distancia a la que podemos acercar un objeto para poder formar su imagen en la retina varía con la edad, alejándose.

ALGUNOS DEFECTOS ÓPTICOS EN LA VISIÓN

A menudo oímos hablar de miopía, astigmatismo o hipermetropía. Muchos de nosotros tenemos un defecto en la visión con alguno de estos nombres y que nos obliga a llevar gafas o lentes de contacto. Otros se someten a una pequeña intervención quirúrgica para evitar llevar lentes. Pero adentrémonos en qué consisten estos defectos y por qué se utilizan lentes para ayudar en la visión a las personas que los sufren.

Los citados defectos tienen que ver con la formación de imágenes en la retina y, por tanto, tienen un carácter óptico, no patológico. Empecemos por la miopía. Si en un ojo sin defectos (*emétrope*) la imagen de los objetos alejados se forma en la retina con el cristalino relajado, en el miope esta se formará antes de la retina (figura 4). Esto puede ser debido a que el ojo sea demasiado largo o a que sea demasiado potente, aun con el cristalino relajado. No existe posibilidad de que se forme la imagen en la retina, pues lo único que puede hacer el cristalino es abombarse y con ello solo conseguiría adelantarla aún más con respecto a ella. Por consiguiente, el miope verá una imagen desenfocada, como cuando en una pantalla proyectamos una diapositiva o una película y no está enfocada, y, por tanto, se ve borrosa (figura 4).

La forma de arreglar este defecto es añadir una lente que envíe la imagen final a la retina, restándole en cierto modo potencia de convergencia de la luz, para que esta se dé a un poco más de distancia. Para ello se emplean lentes divergentes (figura 5).

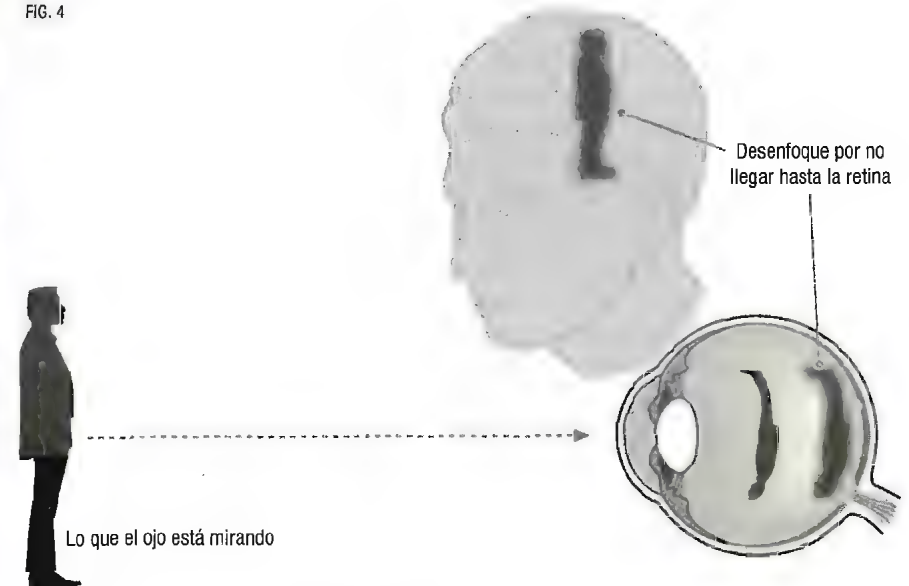
Sin gafas, el miope puede ver bien a determinadas distancias, próximas a su ojo. Acercar un objeto implica alejar la ima-

FIG. 3



Quando la luz que entra en el ojo proviene de un cuerpo lejano, efectúa su entrada con una abertura o divergencia menor que si proviene de un cuerpo cercano. El ángulo representado en cada caso muestra la diferencia.

FIG. 4



Explicado de modo muy simplificado, el problema óptico de un ojo con miopía es que en él la zona de formación de la imagen de lo observado corresponde a un lugar situado antes de la retina. El desenfoque provocado hace que la persona miope perciba la imagen borrosa.

gen en un sistema como el ocular, por lo que habrá una distancia que sitúe al objeto de tal manera que su imagen se forme en la retina.

La hipermetropía es, en cierto modo, lo contrario de la miopía. En este caso, bien porque el ojo sea demasiado corto o porque sea poco potente, la imagen del objeto observado tiende a formarse detrás de la retina, por así decirlo (figura 6), sobre todo al mirar de cerca.

Como la acomodación del cristalino hace acercar la imagen al mismo, el hipermetrope puede acomodar y formar la imagen en la retina de objetos lejanos. Pero claro, necesita estar haciendo un esfuerzo de acomodación aun cuando está observando objetos alejados, y un esfuerzo mayor de lo normal si el objeto se acerca. El cristalino nunca está relajado y el hipermetrope se cansa, en cuyo caso se relajará la acomodación del cristalino y se volverá a la situación de la figura 6. Como consecuencia de ello, verá desenfocado. Esto nos permite entender que los hipermetropes padezcan dolor de cabeza.

La solución de este caso pasará por anteponer al ojo lentes convergentes que lo suplan con la potencia que le falta y así llevar esa imagen a la retina, la cual, estando el cristalino relajado, en el hipermetrope se forma por detrás de ella.

Muchos hipermetropes leves descubren que lo son cuando son ya algo mayores. Mientras han sido jóvenes, sus ojos han estado lo suficientemente fuertes como para no cansarse, aunque mirando a lo lejos necesitaran hacer un esfuerzo de acomodación.

El astigmatismo, por su parte, va ligado tanto a la miopía como a la hipermetropía. Existen astigmatismos miópicos e hipermetrópicos. El aspecto fundamental del astigmatismo se relaciona con la falta de esfericidad de las superficies de la córnea, del cristalino o de ambas. Se dice entonces que el ojo carece de *simetría de revolución*. La consecuencia es ver imágenes con meridianos enfocados y desenfocados simultáneamente. Para entenderlo mejor, imaginemos que estamos viendo una reja con barras de hierro verticales y horizontales. Puede que un astigmático vea nítidas las verticales y desenfocadas las horizontales, o ambas desenfocadas en distinto grado.

Esquema simplificado del mecanismo de corrección visual mediante el cual unas lentes debidamente graduadas, por ejemplo de unas gafas, corrigen el problema óptico provocado por la miopía.

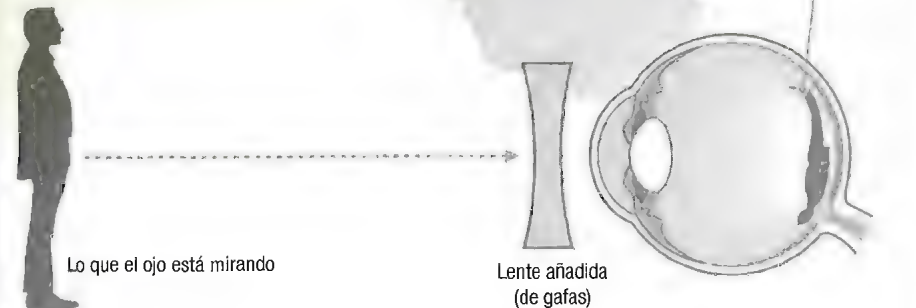


FIG. 5

La hipermetropía coincide con la miopía en el hecho de que en el ojo afectado la zona de formación de la imagen de lo observado corresponde a un lugar que no es el de la ubicación de la retina. Pero a diferencia de lo que ocurre en la miopía, en la hipermetropía el sitio de formación de la imagen sobrepasaría la posición de la retina. El resultado es que la persona con hipermetropía percibe borrosa la imagen siempre que no pueda acomodar.

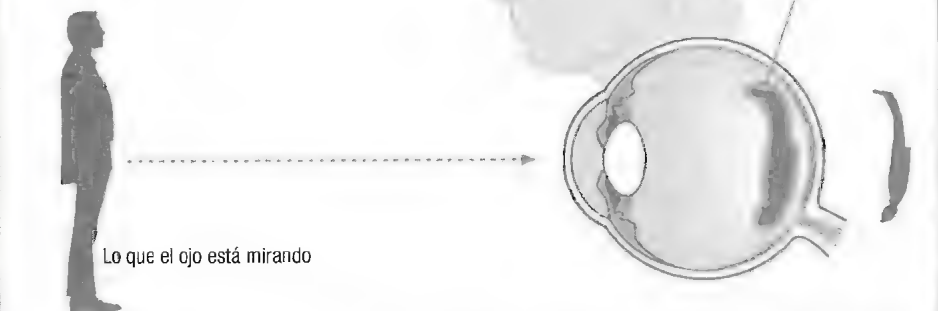


FIG. 6

La solución a este problema es utilizar lentes que tengan distinta potencia según meridianos. En el ejemplo, si el individuo veía bien las verticales, es cuestión de colocarle una lente que le permita ver bien las horizontales, es decir, que lleve la imagen

nítida de estas a la retina, sin dejar de ver bien las primeras. Las lentes que se utilizan para corregir el astigmatismo no tienen superficies esféricas sino que presentan una falta de esfericidad inversa a la que presenta el

La visión es el arte de ver lo que es invisible para otros.

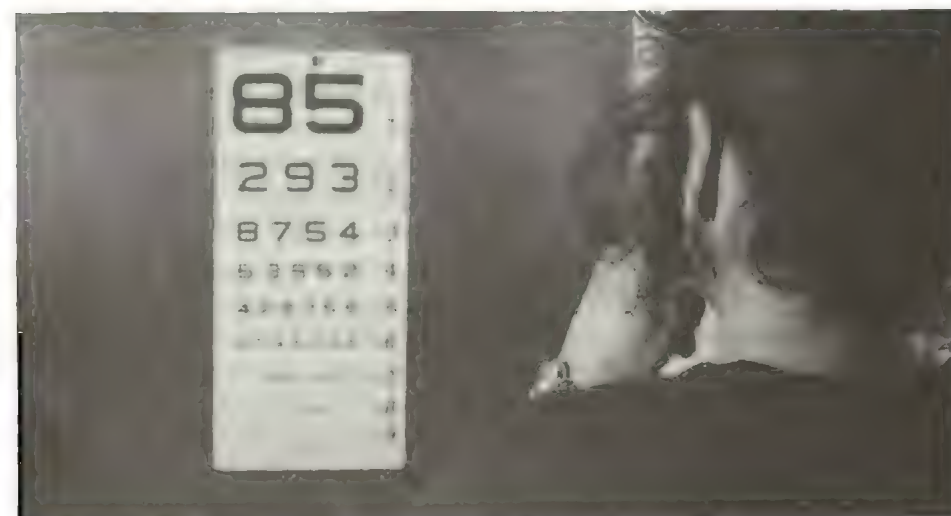
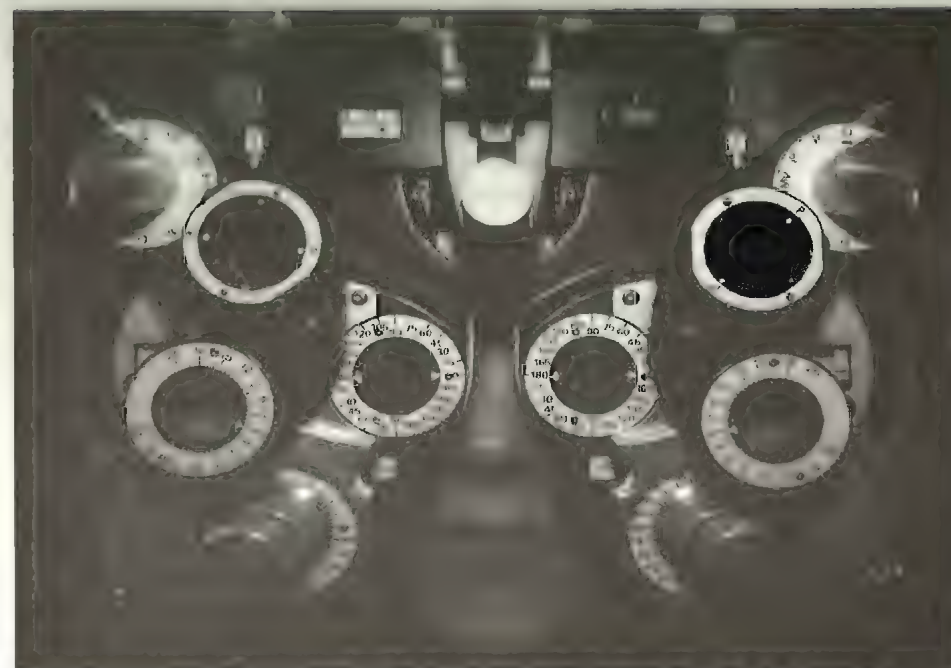
JONATHAN SWIFT

ojo astigmático.

El último de los defectos refractivos que queremos analizar es la *presbicia* o vista cansada. En este caso estamos ante un problema de visión de los objetos cercanos. Como dijimos en el apartado anterior, con la edad se nos aleja la posición en la que hemos de colocar un objeto que queramos ver con detalle. El cristalino va perdiendo la posibilidad de abombarse, bien porque se vuelve más grueso con la edad, bien por falta de elasticidad. En cualquier caso, al no poder abombarse no puede formar imágenes de objetos muy cercanos. Digamos que le falta potencia para hacer la convergencia de la luz capaz de formar la imagen en la retina. Debido a ello nos tenemos que ayudar de lentes convergentes que suplan ese déficit de potencia.

Es importante resaltar que el alejamiento de la posición más cercana al ojo en la que podemos formar una imagen en la retina mediante acomodación es progresivo desde la niñez. No es algo que surja de repente alrededor de los cuarenta años. El problema a esta edad es que dicha posición está ya tan alejada que, dado el tamaño del detalle que queremos observar, no tenemos posibilidad de apreciarlo. Si las letras de los periódicos se hicieran más grandes y tuviéramos los brazos más largos no necesitaríamos gafas para ver de cerca.

Hagamos también una breve mención a las operaciones para corregir estos defectos, en especial la miopía, y que en la actualidad han cobrado un gran auge. Como hemos apuntado, la miopía tiene su origen en un exceso de potencia en el ojo en comparación con su longitud. Para restarle potencia, en vez de añadir



Arriba, un foróptero, aparato de uso común por oftalmólogos y optometristas para evaluar la capacidad visual. Abajo, prueba optométrica para detectar la miopía y medir su magnitud.

una lente divergente en gafa o lente de contacto, se ha pensado en disminuir la curvatura de la única superficie de una lente del ojo a la que podemos acceder con facilidad: la cara anterior de la córnea. Así pues, estas operaciones consisten en una ablación del tejido corneal que aplane algo (quite curvatura) a dicha superficie, para que la córnea sea menos potente. En el caso de la hipermetropía la situación es inversa: se «limas» un poco la parte externa de la cara anterior de la córnea, en anillo, para conseguir más curvatura, más potencia, en la parte central.

Otra de las operaciones de la que solemos oír hablar es la de cataratas. Esta no es una operación para darle al ojo más o menos potencia; el problema es otro. Desde el principio estamos dando por supuesto un hecho importante: los medios oculares han de ser transparentes, es decir, deben dejar pasar la luz como elemento fundamental para formar la imagen en la retina. Sin embargo, por distintas razones, el cristalino puede ir perdiendo transparencia hasta volverse opaco, o translúcido, en cuyo caso la luz no llegará a la retina y tendremos lo que conocemos como «cataratas». La operación de cataratas, por tanto, consiste básicamente en sustituir el cristalino por una lente artificial intraocular.

Dada la complejidad del sistema visual, los trastornos refractivos, antes comentados, no son los únicos que pueden aparecer; pueden surgir también problemas si cualquiera de los sistemas implicados en el proceso de la visión no funciona correctamente. Así, pueden aparecer problemas acomodativos si este sistema no actúa de forma adecuada; o binoculares, ya que tenemos dos ojos que deben actuar conjuntamente; o bien trastornos oculomotores, como consecuencia de que el movimiento ocular no sea el idóneo.

Todo este tipo de problemas suele llevar emparejada cierta sintomatología (dolor de cabeza, visión doble, malestar ocular...) que hace que la visión no sea confortable, provocando habitualmente que la persona que lo padece abandone la tarea visual de que se trate con las repercusiones que eso pudiera tener. Este hecho hace que el problema sea especialmente importante en niños en edad escolar, pues el abandono de sus tareas escolares puede tener serias implicaciones en su futuro.

LOS LÍMITES DE LA VISIÓN

Si alguna vez nos han graduado la vista, probablemente nos habrán colocado frente a una lámina en la que se veían unas letras (o números), preguntándonos si las veíamos, o si estaban hacia arriba, hacia abajo, hacia la izquierda o hacia la derecha. Si acertábamos, la persona que nos realizaba dicha prueba nos presentaba otra fila de letras de menor tamaño, reduciendo este paulatinamente para comprobar hasta qué extremo dábamos respuestas correctas. Es una forma de alcanzar un límite en nuestra visión: evaluar el detalle mínimo que podemos distinguir, o en otras palabras, medir nuestra agudeza visual.

Como ya hemos indicado, tenemos una capacidad limitada en la observación de detalles. Ello es consecuencia de la calidad óptica de nuestro ojo y de las limitaciones que nos impone la retina. Como ya hemos apuntado, en la fovea es donde tenemos mayor densidad de conos y estos van unívocamente conectados a una célula ganglionar, de la que sale una fibra del nervio óptico. Es la zona con mejor agudeza visual. Cuando queremos ver algo con detalle, hacemos que su imagen caiga en la fovea. Sin embargo, los conos tienen un cierto diámetro. El experimento más sencillo para comprobar la capacidad del sistema visual para resolver detalles es observar dos puntos muy próximos y tratar de verlos separados. Para que esto ocurra, la imagen de cada punto ha de formarse en un cono distinto, separados, al menos, por otro cono. Considerando que los conos del centro de la fovea tienen aproximadamente un diámetro de 2,5 micras, ello supone que las imágenes de los puntos han de estar separadas alrededor de 5 micras. O sea, que si queremos ver los puntos sobre una pantalla situada a 6 metros, estos han de estar separados 1,75 milímetros. Y esto suponiendo que la imagen del punto sea realmente un punto, que no lo es, dado que en realidad se trata de una mancha circular de una cierta extensión, debido a lo que llamamos *aberraciones* y difracción en el ojo. Así pues, en el ejemplo mostrado, si los puntos estuvieran separados por menos de 1,75 mm no los veríamos como dos sino como uno. Por tanto, no resolveríamos detalles menores de esa magnitud.

Existen otras muchas pruebas para mostrar los límites de las distintas funciones visuales. Por ejemplo, en la capacidad para ver si dos trazos están alineados o si distintos objetos están en el mismo plano o en otro diferente. También es distinta nuestra capacidad para ver detalles si estos tienen alto contraste o no. En el caso de la graduación de la vista nos colocan letras negras sobre fondo blanco. Si nos colocaran letras gris claro, seguro que dejaríamos de distinguirlas mucho antes.

Otros aspectos están relacionados con el tiempo. Por ejemplo, sabemos que si una luz es alternante o parpadeante, es decir, que se enciende y apaga rápidamente, es muy molesta. Esto ocurre cuando un tubo fluorescente se está agotando. Sin embargo, si aumenta la frecuencia del encendido y apagado, las cosas cambian pues puede que no se aprecie dicho parpadeo y se vea la luz como continua. Siguiendo con el ejemplo del tubo fluorescente, si este funciona normalmente lo veremos como una luz continua cuando en realidad se enciende y apaga 50 veces por segundo. Por tanto, si se repiten luces o imágenes muy rápidamente el sistema visual no es capaz de verlas por separado sino que se dice que las «fusiona». Existe entonces un límite en la capacidad de ver dos luces distintas que varían en el tiempo.

En cualquier caso no queremos dar la impresión de que tenemos un sistema visual muy limitado o incluso malo. Nada más lejos de nuestra intención y de la realidad. Lo que queremos expresar es que es bueno saber qué límites tiene nuestra visión y que nuestra percepción del mundo exterior viene condicionada por ellos. Cuando queramos ir más allá, necesitaremos instrumentos ópticos que ayuden al ojo a ver, como hemos visto que hacen los microscopios y los telescopios.

LA VISIÓN DEL COLOR

Es interesante profundizar sobre algunos aspectos de la visión del color, ya que este es uno de los principales protagonistas de nuestra percepción visual. Hemos apuntado anteriormente que percibimos color en los objetos que nos rodean gracias, en prin-



Dos tipos de lentes para corregir defectos visuales. Arriba, las más comunes, las de gafas. Las lentes de contacto o lentillas (abajo) se colocan directamente en la córnea.

cepto, a que disponemos de tres tipos distintos de conos en nuestras retinas. Necesitamos suficiente luz para que podamos percibir el color, ya que los conos no se excitan con poca luz. El color es, por tanto, un atributo de nuestra percepción visual y no una propiedad intrínseca de la luz, como suponían algunos investigadores antiguos y aún hoy suponen muchas personas que hablan de él. La luz es el agente físico que provoca la sensación de color, pero para percibirlo necesitamos disponer de una cantidad suficiente de luz y unas células en nuestro sistema visual que la conviertan en color. Otros animales reciben luz, pero no perciben color.

No solamente percibimos el color gracias a los conos. También disponemos de células que hacen comparaciones de las señales generadas por ellos y establecen los antagonismos rojo-verde y amarillo-azul en la percepción cromática. Estos antagonismos se pueden comprender si nos damos cuenta de que no hay colores a los que califiquemos como rojos verdosos o amarillos azulados. Puede haber un verde amarillento pero no un azul amarillento. En nuestra percepción del color evaluamos si el del objeto que estamos percibiendo tiene más de rojo que de verde o más de amarillo que de azul, o si están equilibrados en estas comparaciones, como ocurre con el blanco.

Otra evidencia de la existencia de estos antagonismos es que hay personas a los que les fallan. Los popularmente llamados *daltónicos* son personas que confunden rojos y verdes. Hay daltónicos de distintos tipos y en distintos grados, pero en estadísticas fiables realizadas en España y Europa se encuentra que lo es el 8% de la población masculina. Muchos ni siquiera saben que lo son. El hecho de que los daltónicos sean principalmente hombres (las mujeres son menos del 0,5%) es debido a que el daltonismo, o más correctamente expresado, las anomalías en la visión del color, aparecen principalmente unidas a la herencia genética ligada al sexo. Se dice que los varones lo padecen y las mujeres lo transmiten, como es el caso de enfermedades como la hemofilia.

El número tres es fundamental en la visión del color. Tres son los tipos de conos y tres son los primarios (colores fundamen-

tales) a partir de los cuales y por mezcla de ellos en cantidades apropiadas se puede obtener cualquier color. Si nos referimos a los primarios de un sistema de televisión, estos son rojo, verde y azul. Para verlos basta con acercarse con una lupa a un monitor de televisión o de ordenador encendido. En imprenta o fotografía se emplean los conocidos como primarios sustractivos: amarillo, magenta y cian, a los que se les suele añadir el negro en los procesos de impresión.

Tres son también los atributos necesarios para describir el color, como nos dicen los psicólogos: el *tono*, la *claridad* y la *saturación*. Decimos que un objeto es de color verde (tono), vivo (saturación) y claro (claridad). A menudo solo utilizamos uno (el tono) o dos (el tono y la claridad o la saturación).

Un aspecto que debe ser considerado es que el color se puede medir con números (también tres), y no solo describirlo con palabras. La ciencia que se desarrolla para ello se denomina *colorimetría* y ha surgido principalmente por necesidades de la industria. Dar números para identificar un color es introducir objetividad en la descripción del mismo y que se puedan entender personas en distintas partes del mundo que no están viendo en el mismo lugar el color de un objeto. Además, es fundamental para reproducirlo en los procesos industriales. Pensemos en una fábrica de coches que tiene un color en el catálogo y que ha de fabricar un vehículo pintado con él un día tras otro. Ya no basta que una persona diga si el color que se está fabricando es siempre el mismo. Conviene que un instrumento, el colorímetro, nos confirme dicha realidad de forma objetiva, no sujeta a los estados de ánimo de una persona y a su propia subjetividad.

Se pueden considerar otros muchos aspectos de la visión del color, como la variación de la apariencia de uno en función de los del entorno. No se ve igual un trozo de cartulina roja sobre fondo rojo que sobre fondo azul. En este último caso parece más roja. Otro fenómeno a estudiar sería en cierto modo el contrario: el que distintos colores puedan parecernos iguales en determinadas circunstancias. Nos referimos, por ejemplo, a que el color de un coche pueda parecernos siempre igual aunque cambie porque la luz que ilumina el vehículo es muy distinta. Tampoco tiene el

LA VISIÓN EN EL REINO ANIMAL

Siempre podemos encontrar que la mayoría de los animales tienen un sistema visual parecido al del ser humano, es decir, diferentes tipos de conos que les permiten ver los colores, la forma y del tamaño de lo que se les aparece su vida. La primera que podemos observar a simple vista es la diferencia de sus ojos. El ser humano y los depredadores los tienen colocados frontalmente, lo que les proporciona una buena *estereoscopia* y, por tanto, un buen cálculo de distancias; sin embargo, los herbívoros los tienen en los laterales de su cabeza, lo que hace que su *estereoscopia* sea muy pobre, pero, a cambio, consiguen tener un campo visual muy grande, próximo a los 360°, que les permite detectar la presencia de un depredador.

Adaptándose a las condiciones de luz

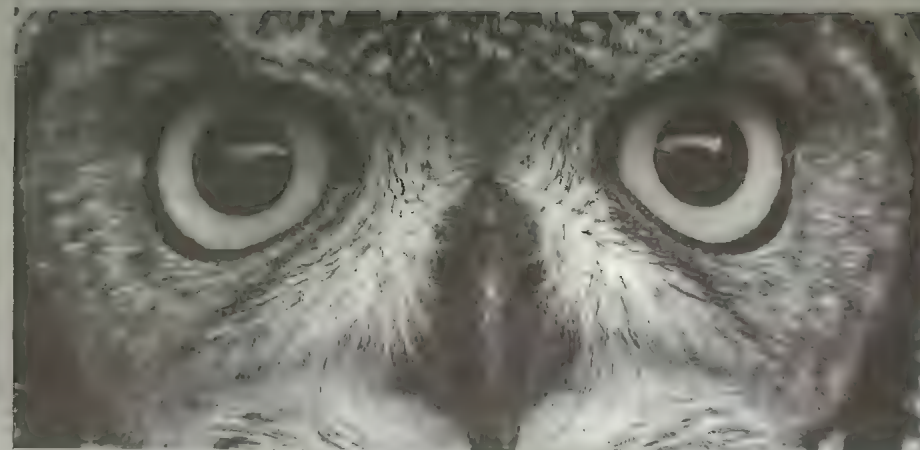
La cantidad de luz presente en el entorno en el que viven ha condicionado la aparición de modificaciones en el sistema visual de distintos animales, ya que, aunque el rango de respuesta del sistema visual humano es muy amplio, a veces las condiciones pueden ser aún más extremas. Un ejemplo de esto se da en el sotobosque tropical, donde la cantidad de luz es tan baja que cualquiera de nosotros diría que estamos en oscuridad absoluta; sin embargo, hay ranas que viven en ese bosque, ven perfectamente y bajan de las partes altas de los árboles para reproducirse. Ejemplos más próximos los podemos encontrar en animales que desarrollan parte de su actividad en ambientes nocturnos; así, las rapaces nocturnas tienen grandes pupilas que les permiten captar cantidades mínimas de luz. Para los animales que desarrollen su actividad tanto de día como de noche, es necesario un mecanismo de protección para que la luz no dañe sus fotorreceptores. Los gatos consiguen esto gracias a su pupila vertical, que puede cerrarse hasta dejar una apertura mínima, mientras que para la visión nocturna disponen de pequeños espejos (*tapetum*) que les permiten aprovechar al máximo la luz que les llega. La pupila horizontal del pulpo es una solución intermedia: no puede abrirse tanto como la de la luciértraga ni cerrarse tanto como la del gato, pero le permite ver a lo largo de casi todo el día.

Sensibilidad a ciertas formas de luz

Los humanos no somos capaces de detectar el estado de polarización de la luz que nos llega, pero muchos animales sí, lo que les ayuda en su vida diaria; como las abejas o las hormigas, que la utilizan para encontrar su camino de regreso. También la detectan murciélagos, tarántulas e incluso perros y gatos. Por otro lado, somos sensibles a longitudes de onda comprendidas entre 350 y 750 nm, aproximadamente (espectro visible), pero este intervalo es diferente en algunos animales. Por ejemplo, existen serpientes que son sensibles al infrarrojo, lo que les permite detectar la presencia de una posible presa gracias a la radiación de ese tipo (calor) que emite su cuerpo por estar a una cierta temperatura. En el otro lado del espectro, hay muchos animales que son sensibles al ultravioleta, como es el caso de numerosas mariposas.

Diferentes a los humanos

Aunque muchos seres vivos tienen tres tipos de conos que les proporcionan visión del color (*tricromatas*), hay animales con un número de conos diferente; por ejemplo, los perros o los to-



ros sólo tienen dos, lo que les proporciona una visión del color muy pobre respecto a la nuestra. La agudeza visual también puede cambiar, encontrándonos animales que la tienen bastante superior al hombre, como el león o el halcón. En este último, se debe principalmente a tres factores: su pupila es mayor que la nuestra, con lo que sus ojos están menos afectados por la difracción; sus fotorreceptores (es decir, los «píxeles» de sus ojos) son más pequeños, por lo que en una misma superficie habrá mayor cantidad de ellos; y la forma de su retina y sus índices de refracción hacen que se comporte como un teleobjetivo. Por último, uno de los sistemas visuales que más se aleja del de los seres humanos se encuentra en ciertos artrópodos, principalmente insectos y crustáceos. Se trata de los ojos compuestos, conocidos como ojos de *aposición*. En realidad están constituidos por multitud de ojos en miniatura, llamados *ommatidios* (unos 4.000 en cada ojo), que forman imágenes de distintas partes de su entorno. Estas imágenes se procesan gracias a un «cableado» neuronal especial, por lo que estos ojos de aposición se conocen también como *ojos de superposición neuronal*.



Las grandes pupilas de las rapaces nocturnas (arriba) les permiten ver en condiciones de escasa luminosidad. Sobre estas líneas, ojo compuesto de un insecto en el que pueden apreciarse los ommatidios que lo conforman.

mismo color si está iluminado por la luz del Sol en un día despejado o bien en uno nublado, y sin embargo disponemos de mecanismos para que nos parezca el mismo. A este mantenimiento del color de un objeto con independencia de la fuente que lo ilumina se le llama *constancia de color*.

LA VISIÓN DE PROFUNDIDAD

Nuestro sistema visual, a partir de imágenes más o menos planas en la retina, nos ofrece la posibilidad de ver las escenas en relieve, los volúmenes de los objetos, en definitiva, en tres dimensiones. Para ello tenemos mecanismos tanto con un solo ojo (monoculares) como con los dos (fusión y estereoscopia).

Con un solo ojo tenemos abundantes rasgos que nos permiten percibir si un objeto está delante o detrás de otro: las sombras, las diferencias en la acomodación para percibir uno u otro o la perspectiva. Si cerramos un ojo, con el otro apreciamos la profundidad sin más que ver si un objeto tapa a otro o si vemos unos enfocados y otros desenfocados.

Sin embargo, la mejor ayuda para poder percibir la profundidad nos la da el disponer de dos ojos. Cada uno de ellos formará una imagen ligeramente distinta de una escena, pues han sido captadas desde ángulos distintos. Basta con que alternemos entre mirar solo con el ojo izquierdo y solo con el derecho para apreciar que son ligeramente distintas. Estas dos imágenes las fusionará después el cerebro en una única imagen. Como consecuencia de esta fusión aparece el fenómeno de la *estereopsis*, que nos aporta una percepción adicional de la profundidad, es decir, ver en tres dimensiones, aprovechando las ligeras diferencias entre las dos imágenes.

Este aspecto de nuestra visión se utiliza cuando se quiere simular la tercera dimensión en el cine o en la fotografía. Probablemente hayamos visto alguna película en tres dimensiones, para la que hemos tenido que emplear unas gafas especiales. En realidad lo que se proyecta en la pantalla son dos películas ligeramente desplazadas una respecto de la otra. Las gafas, median-

te diversas técnicas, hacen que veamos con un ojo una de las imágenes de la pantalla, y con el otro, la otra. Nuestro cerebro hace el resto, es decir, la fusión de ambas y que veamos solo una en tres dimensiones.

Pero todo lo anterior son solo esbozos de lo que se conoce del sentido de la visión en algunos de sus aspectos más sobresalientes. No hemos dicho nada de la percepción de la forma, de la textura o el movimiento. Conviene apuntar que es mucho lo que se sabe de los aspectos físicos, fisiológicos y psicológicos de la visión, pero es mucho más lo que se desconoce. Llama la atención que la pregunta que planteábamos en el título del capítulo se la hicieran ya en la Grecia clásica y que nos la sigamos haciendo hoy en día. Sin duda, porque la visión es uno de los campos de investigación más fascinantes a los que el ser humano puede dedicar su tiempo y sus esfuerzos.

Lo mismo puede decirse de muchas otras facetas de la interacción entre la luz y el resto del universo. Aunque es mucho lo que la ciencia ha conseguido averiguar sobre la naturaleza y la conducta de la luz, hay todavía grandes enigmas pendientes de resolver y probablemente surgirán otros a medida que se profundice en su conocimiento. La investigación en la física de la luz afronta sin duda un futuro fascinante.

- BEGUNOV, B.N. y ZAHAZNOV, N.P., *Optical instrumentation*, Moscú, Editorial Mir, 1988.
- BILLMEYER, F.W., SALTZMAN, M. y BERNIS, R.S., *Principles of color technology*, Hoboken, Wiley, 2000.
- CASAS, J., *Óptica*, Zaragoza, Universidad de Zaragoza, 1994.
- COLLET, E., *Field guide to polarization*, Bellingham, SPIE Press, 2005.
- DITCHBURN, R.W., *Óptica*, Barcelona, Editorial Reverté, 1982.
- HECHT, E., *Óptica*, Madrid, Addison-Wesley, 2000.
- KLEIN, M.V. y FURTAK, T.E., *Optics*, Hoboken, Wiley, 1986.
- MALACARA, D., *Óptica básica*, Madrid, Fondo de Cultura Económica de España, 2006.
- MILLÁN, M.S., ESCOFET, J. y PÉREZ, E., *Óptica geométrica*, Barcelona, Editorial Ariel, 2003.
- PEDROTTI, F.L., PEDROTTI, L.S. y PEDROTTI, L.M., *Introduction to optics*, Harlow, Pearson, 2014.
- ROMERO, J., GARCÍA, J.A. y GARCÍA-BELTRÁN, A., *Curso introductorio a la óptica fisiológica*, Albolote, Editorial Comares, 1996.
- RONCHI, V., *Optics: The Science of Vision*, Mineola, Dover, 1991.

- TARABOV, L. Y TARABOVA, A., *Charlas sobre la refracción de la luz*, Moscú, Editorial Mir, 1985.
- TIPLER, P.A. Y MOSCA, G., *Física para la ciencia y la tecnología*, Barcelona, Editorial Reverté, 2005.
- VV.AA., *Manual de Alumbrado Philips*, Madrid, Paraninfo, 1994.
- VV.AA., *Unidad didáctica: Ciencia con luz propia. Aplicaciones tecnológicas de la luz*, Alcobendas, FECYT, 2015.

ÍNDICE

- absorción 16, 26-29, 46, 48, 49, 69, 76, 83, 85-87, 112, 113
- acomodación 128, 129, 133, 134, 136-138, 148
- agudeza visual 128, 141, 147
- Alhacén 32, 33
- arcoíris 9, 10, 21, 30, 78-80
- Arquímedes 32
- astigmatismo 128, 134, 136, 138
- bastones 131, 132
- bioluminiscencia 9, 46, 47
- birrefringencia 69, 82, 83
- Bohr, Niels 37
- Brewster, David 98
- caleidoscopio 98
- cámara fotográfica 8, 11, 31, 101, 108-110, 112, 133, 134
- catodoluminiscencia 46
- colorimetría 145
- composición espectral 17, 21, 29, 30, 59
- conos 131, 132, 141, 144, 146
- constancia del color 148
- contaminación lumínica 10, 41, 43, 61, 64, 65
- córnea 99, 128, 129, 133, 136, 140, 143
- cristalino 115, 128-130, 133, 134, 136, 138, 140
- daltonismo 144
- densidad óptica 86
- detectores de luz 16, 109, 112, 113, 120, 121, 131
- difracción 9, 24, 34, 36, 69, 87, 88, 112, 113, 141, 147
- difusión 76, 83-85
- dioptría 100, 101
- dispersión 67, 69, 78, 79, 82, 83
- distancia focal 100

efecto
 Compton 36
 fotoeléctrico 36
 Einstein, Albert 36, 116, 118
 electroluminiscencia 46, 54
 emétrope 134
 esparcimiento 9, 69, 83, 84
 o difusión de Mie 85
 o difusión de Rayleigh 85
 espectro 9, 21, 25, 29, 30, 38, 45,
 54, 55, 59, 75, 79-82, 85, 88,
 104-106, 110, 112, 113, 132, 146
 espectrografía/espectroscopia
 11, 82, 105
 espejismo 18, 70
 espejos 10, 11, 18, 32, 33, 60, 69,
 71-74, 94, 96-100, 104, 114, 130,
 146
 cóncavos 99
 convexos 99
 esféricos 99, 104
 parabólicos 99
 planos 94, 97, 98
 estereoscopia 146, 148

 Faraday, Michael 36
 fibra óptica 10, 17, 25, 117-120
 fluorescencia 46, 48, 49, 52, 56
 fosforescencia 46, 48, 49
 fotoluminiscencia 46
 fotón 28, 29, 32, 36-38, 55
 fotónica 11, 91
 fóvea 129, 131, 141
 frecuencia 21-23, 27, 28, 36-38,
 115, 120, 142
 Fresnel, Augustin 35
 fuentes de luz 8, 10, 15-20, 30, 31,
 41, 43-45, 48-50, 52, 54-56, 60,
 72, 73, 84, 112, 114-116

 Galileo 33

 Grimaldi, Francesco Maria 34

 hercio 23
 hipermetropía 128, 134, 136, 137,
 140
 Hooke, Robert 33, 34
 Huygens, Christiaan 34

 iluminación 8, 10, 16, 17, 20, 43,
 44, 47-50, 52-57, 59-61, 63-65,
 130, 132, 145, 148
 imagen 10, 11, 23, 32, 72, 76, 93-
 100, 102, 104, 108-110, 112,
 120, 128-138, 140-142, 147-149
 multiespectral 110
 real 94, 96, 97, 99, 109, 129
 virtual 94, 96, 97, 99
 incandescencia 30, 44-46, 50-54,
 56, 87, 93, 95, 115
 infrarrojo 20, 25, 46, 51, 55, 104-
 106, 110, 112, 118, 120, 121,
 146
 interferencias 24, 34, 36, 88, 89,
 122

 Lambert-Beer, ley de 85, 86, 113
 lámparas 16-18, 20, 28, 48-50, 54,
 57, 60, 64, 71, 73, 113
 de descarga 52, 116
 de incandescencia 30, 45, 46,
 50-54, 56, 87, 93-95, 115
 fluorescentes 16, 17, 48, 52-54,
 56, 115, 142
 LED 16, 54-56
 láser 8, 10, 11, 17, 18, 29, 49, 87,
 114-118, 120
 lentes 11, 33, 76, 97, 100-102, 104,
 108, 114, 128, 129, 133, 134,
 137, 138, 140
 convergentes 81, 100, 108,
 136, 138

de contacto 129, 134, 140,
 143
 divergentes 100, 108, 134,
 140
 intraoculares 140
 Leonardo da Vinci 33
 longitud de onda 21-30, 38, 45,
 48, 49, 55, 59, 74-76, 78, 79, 82,
 84-88, 102, 104-106, 110, 112,
 113, 115, 116, 118, 120-122,
 132, 146
 luminiscencia 44, 46
 luz
 coherente 114, 118
 cuasimonocromática 29, 115,
 118
 monocromática 29, 36, 110,
 115, 116
 natural 30, 31, 50, 56, 57, 59,
 61
 polarizada 30, 31, 74, 83, 84,
 122
 policromática 29, 30, 56, 115

 Maxwell, James Clerk 24, 35,
 36
 microscopio 20, 33, 97, 101-104,
 110, 142
 miopía 128, 134-139

 Newton, Isaac 34, 80, 81
 nivel de iluminación 57, 60, 65

 ojo 15-18, 20, 32, 59, 71, 77, 87,
 96, 97, 99, 101, 102, 104, 106,
 109, 114, 115, 120, 121, 127-
 131, 133-138, 140-142, 146-
 149
 ondas electromagnéticas 24, 25,
 27, 30, 32, 36, 83, 88
 óptica 7, 11, 32-34, 39

 piroluminiscencia 44
 Planck, Max 28, 36
 constante de 36, 38
 polarización 17, 24, 30, 31, 34-36,
 74, 84, 122, 146
 presbicia 128, 138
 principio
 de complementariedad 37,
 38
 de Fermat 70
 de indeterminación 37
 prisma 80-82, 88, 108, 112
 prismáticos 104, 108
 pupila 130, 146, 147

 quimioluminiscencia 46

 radiación del cuerpo negro 36,
 45, 50
 radioluminiscencia 46
 red de difracción 88, 112, 113
 reflectancia 75
 reflexión 32-34, 36, 67, 69, 71-73,
 77, 85, 119
 difusa 71-76, 84, 94
 especular 32, 71-74, 94
 total 118, 119
 refracción 9, 32, 36, 67, 69, 71,
 73, 76-79, 81-83, 85, 118, 119,
 122
 índice de 69, 70, 76-79, 97,
 101, 122, 123, 147
 ley de la 33, 34, 76, 78, 83,
 118
 refractometría 122, 123
 retina 20, 32, 115, 128-138, 140,
 141, 144, 147, 148

 telescopios 33, 97, 102, 104, 106-
 108, 142
 transmitancia 86, 112

triboluminiscencia 46

ultravioleta 20, 25, 29, 48, 49,
104, 105, 107, 112, 118, 146

visión del color 128, 131, 132,
142, 144-147

Young, Thomas 34, 35

La física de la luz

¿Cuántas veces nos hemos preguntado «qué es la luz»? Su respuesta ha tenido ocupados a muchos científicos desde hace más de dos mil años. Los modelos que se han propuesto para explicar su naturaleza han generado multitud de aplicaciones que han trascendido a nuestra vida cotidiana. La luz nos permite ver, explorar el universo macro y microscópico, y su manipulación está permitiendo una mayor capacidad y velocidad en los sistemas de transmisión y procesamiento de la información.

Javier Romero y **José Antonio García** son profesores del Departamento de Óptica de la Universidad de Granada.